

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : électrotechnique

Spécialité : commande électrique

Par : DJELTI CHEHAB EDDINE

Sujet

L'étude des convertisseurs de l'électronique de puissance appliqué à l'énergie éolien

En ligne : en vidéo conférence le 23 / 09 /2021 devant le jury composé de :

M.LOUCIF	Maitre de conférences B	U.A.B.-Tlemcen	Président
H. SMAIL	Maitre de conférences B	U.A.B.-Tlemcen	Directeur de mémoire
F. DJAAFAR	Docteur	U.T.O.M.B	Co- Directeur de mémoire
B. YACOUBI	Maitre-assistant B	U.A.B.-Tlemcen	Examineur 1

Dedidace :

Je dédie ce travail à

- Chère maman et père .
- Mes frères Amin et Ali et Aya et mon ami Elias.
- A tous mes proches et amis.

Romerciement :

Mes premiers remerciements à Dieu le Miséricordieux de m'avoir hébergé la foi, le courage et la patience qui m'ont permis de mener à bien et de compléter ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement mademoiselle Ismail Houria, Maitre de Conférence A l'Université d'Abu Bakr Belkaid et au directeur de cette lettre de proposer et pour suivre et diriger ce travail, mais aussi pour le respect que j'ai ressenti. la remercier pour me faire bénéficier de son expérience de recherche et des orientations constructives qui m'ont permis de faire ce travail.

On tient aussi à remercier, Madame Fatiha DJAFAAR, Docteur à l'Université des sciences et technologies Mohamed Boudiaf à Oran co-directeur de ce mémoire pour avoir suivi et surveillé l'état d'avancement ce travail, mais aussi pour le respect et le professionnalisme dont on a été témoin.

Toute la gratitude à Monsieur Mourad Loucif et B. Yacoubi tous deux enseignants à l'Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, qu'ils aient accepté d'examiner et présidée ce travail, on les remercie pour leurs observations et leurs remarques pertinentes, directe et constructives.

Je tiens à remercier tous les professionnels du contrôle électrique et tous mes camarades de promo.

TABLE DES MATIERS :

Intrdoduction générale

Chapitre1 : Généralités sur l'énergie éolienne

<i>Dedidace</i> :	I
TABLE DES MATIERS :	III
Introduction générale	1
Introduction.....	1
1. Le potentiel éolien.....	1
2. Définition de l'éolienne :.....	2
3. Différents types des éoliennes.....	3
3.1. L'éolien a axe vertical :.....	3
3.1.1. Aérogénérateurs à rotor de Darrieu :.....	3
3.1.2. Aérogénérateurs à rotor de Savonius :.....	5
3.2. L'éolien à axe horizontal :.....	5
4. L'architecteur de l'éolien :.....	6
4.1. Les pales :.....	6
4.2. Le rotor.....	7
4.3. La nacelle	7
5. Modes de fonctionnement des éoliennes :.....	7
5.1. Les éoliennes à vitesse fixe :.....	7
5.2. Les éoliennes à vitesse variable :	8
6.1. Générateurs asynchrones à cage d'écureuil	11
6.2. Générateurs asynchrones à double alimentation	12
6.3. Générateurs asynchrones à double alimentation à énergie rotoriqué dissipée	12
6.4. Générateurs asynchrones à double alimentation à structure de Kramer.....	13
6.5. Générateurs asynchrones à double alimentation avec cyclo convertisseur	14
6.6. Générateurs asynchrones à double alimentation à structure Scherbius.....	15
6.7. Générateurs asynchrones à double alimentation avec convertisseur matriciel.....	16
6.8. Générateurs synchrone	17

6.9. Comparaison des trois générateurs.....	18
Conclusion	19
Bibliographie.....	19

Chapitre2 : Modélisation d'un system éolien

1 Introduction :	23
2 Conversion de l'énergie éolienne:	23
2.1 Modélisation du vent:.....	23
1.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	24
1.2. Théorie de Betz:	25
2. Modélisation du système de conversion de l'énergie éolienne	27
2.1. Hypothèses simplifiées du modèle mécanique de la turbine :	27
2.2. Modèle de la turbine :.....	27
2.2.1. Puissance mécanique de la turbine :.....	27
2.2.2. Coefficient de puissance:	28
2.2.3. Couple mécanique de la turbine :.....	29
2.3. Modèle du multiplicateur :	29
2.4. Equation dynamique de l'arbre de transmission :	30
3. Stratégie de la commande d'une éolienne à vitesse variable.....	31
3.1. Principe de MPPT :	31
3.2. Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable :.....	31
3.3. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :.....	33
3.3.1. Système d'orientation des pales (Pitch Control) :.....	33
3.3.2. Système à décrochage aérodynamique (Stall Control) :	34
4. Modèle généralisé d'une MADA	34
4.1. Mise en équation de la partie électrique dans le plan a, b, c	35
4.1.1. Hypothèses simplificatrices :	35

4.1.2. Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de <i>Park</i> :	38
4.2. Calcul du couple électromagnétique	41
5. Conclusion :	42
Bibliographie.....	42

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques

Introduction :	44
1. Les convertisseurs statiques:	44
1.1. Origine des convertisseurs de puissance électrique :	45
1.2. Famille des convertisseurs statiques	45
1.2.1. Convertisseur conventionnel (Back-to-Back).....	46
1.2.2. Convertisseur multiniveaux	47
1.2.3. Convertisseur matriciel	48
2. Modélisation des convertisseurs de puissance :	50
2.1. Structure du Convertisseur côté machine.....	50
2.2. Modélisation des convertisseurs de tension :	51
3. Commande CCM (coté machine) :	54
3.1. Modulation de largeur d’impulsion sinus-triangle « MLI-ST » :	55
4. Modélisation de la connexion du convertisseur côté réseau	60
4.1. Modélisation du bus continues :	61
4.2. Modélisation du filtre passif :	62
5. Contrôle des puissances de convertisseurs côté réseau	62
5.1. Orientation de tension statorique VOC	62
5.2. Contrôle de la tension du bus continu :	64
6. Conclusion :	65
Bibliographie.....	66

Chapitre 4 :L'interprétation des résultats de simulation

1. Introduction :	68
2. L'explication de simulation :	68
2.2. Convertisseur coté réseau.....	69
3. Résultats de simulation.....	70
3.1. Simulation a vitesse fixe :	70
3.2. Simulation a vitesse variable :	73
4. Conclusion :	76

TABLE DE FIGURES

Figure I.1 : Carte du gisement éolien en Algérie (CDER) [1]	3
Figure I.2: Conversion de l'énergie cinétique du vent.	3
Figure I.3 : Principaux organes du système de conversion éolien [2].	4
Figure I.4 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) [3].	5
Figure I.5 :Différentes types des éoliennes à axe vertical [4]	5
Figure I.6 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius) [3].	6
Figure I.7: Configurations à axe horizontal [3]	6
Figure I.8: Architecture d'une éolienne à axe horizontal [5].	7
Figure I.10 : Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne [3].	8
Figure I.11 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne. [6]	9
Figure I.12 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne [6].	10
Figure I.13 : Système éolienne à base de machine asynchrone à cage d'écureuil. [5]	11
Figure I.14 :Système éolienne à base de MADA à énergie rotorique dissipée [4].	12
Figure I.15– Système éolienne à base de MADA structure de Kramer [5].	13
Figure I.16– Système éolien à base de MADA avec cyclo convertisseur [7].	14
Figure I.17 : Système éolien à vitesse variable à base de MADA structure Scherbius [7]	15
Figure I.18 :Système éolien à vitesse variable à base de MADA avec convertisseurs matriciel.[4]	
Figure I.19 Système éolien à vitesse variable à base de machine synchrone [8].	17
Figure II.1 – Représentation d'une colonne d'aire [3].	22
Figure II.2 – Tube de courant autour d'une turbine éolienne [5].	23
Figure II.3– Configuration d'un système de conversion de l'énergie éolienne [6].	24
Figure II.4 – La caractéristique du coefficient de puissance en fonction de λ [8].	26
Figure II.5– Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien [6]	27
Figure II.6 : Zone de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [6]	29
Figure II.8 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique [11].	34
Figure II.9 : Transformation de Park [12].	34
Figure II.10 : Représentation des enroulements de la machine de Park. [11]	36

Figure III.1 : Famille des convertisseurs statiques[2].	41
Figure III.2 :La structure de convertisseur Back to Back [3].	42
Figure III.3 : Structures d'un convertisseur multiniveaux [4].	43
Figure III.4 : Structure d'un convertisseur matriciel triphasé [5].	44
Figure III.5 : La structure AC-DC-AC (en anglais « back-to-back ») [6].	45
Figure III.6 : Structure de la MADA avec un convertisseur côté machine CCM. [6]	45
Figure III.7 : Schéma structurel d'un convertisseur de tension triphasé [7].	46
Figure III.8 : Principe de commande en MLI-ST [7].	50
Figure III.9 :Schéma de contrôle de convertisseur coté machine [9].	51
Figure III.10 : Schéma de principe pour le modèle de MADA en mode de contrôle de puissance [9].	52
Figure III.11 : Connexion du CCR au réseau électrique [10].	53
Figure III.12 : Schéma électrique du bus continu [11].	54
Figure III.14 : Orientation de tension statorique [12]	55
Figure III.15 :Schéma de contrôle de convertisseurs coté réseaux [9].	56
Figure III.16 : Principe de commande de la tension du bus continu [7].	57
Figure IV.1 : Relation entre le couple et la vitesse de la machine.	60
Figure IV.2 : La puissance active P_s et réactive Q_s.	61
Figure IV.3 :Les courant i_{dr} et i_{qr}	61
Figure IV.4 :Tension de bus continue	62
Figure IV.5 :Les courants filtre direct i_{df} et en quadrature i_{qf}	62
Figure IV.6 :Relation entre la vitesse et le couple électromagnétique.	63
Figure IV.7 : L'allures des puissance active P_s et réactive Q_s	63
Figure IV.8 : Les courants direct et quadrature de rotor.	64
Figure IV.9: L'allure de tension de bus continue V_{bus}.	64
Figure IV.10: L'allures des tensions coté réseaux direct et en quadrature.	65

Liste des symboles :

P : Matrice de Park.

f : Coefficient de frottement visqueux (Nms/rd).

g : Glissement du rotor.

p : Nombre de pair de pôle.

T_{em} : Couple électromagnétique de la machine (N.m).

T_l : Couple résistant (N.m).

T_{aer} : Couple aérodynamique (N.m).

T_g : Couple issu du multiplicateur (N.m).

J_g : Inertie de la génératrice (Kg ml) .

J_t : Inertie de la turbine (Kg m2) .

J : Inertie totale (Kg m2).

$\Omega_{turb.}$: Vitesse de la turbine (Rad/s).

$\Omega_{mec.}$: Vitesse mécanique (Rad/s) .

P_m : Puissance mécanique de la turbine.

P_{mt} : Puissance totale théoriquement disponible.

P_{max} : Puissance maximale extraite.

β : Angle de calage.

C_p : Coefficient de puissance

λ : Ratio de vitesse.

ρ : Masse volumique du vent

G : Multiplicateur mécanique

S : Surface balayée par la turbine

R : Rayon de la turbine

V_v :Vitesse de vent (m/s)

V_{estime} : Vitesse estimée du vent

V_{max} : Vitesse maximale du vent

V_{min} : Vitesse minimale du vent.

s : Indice des axes correspondant au stator

r : Indice des axes correspondant au rotor

i_m :Courant de magnétisation à vide (A)

i_{rm} :Courant fourni par la génératrice (A)

i_c : Courant traversant le condensateur

i_{gm} : Courant modulé par le convertisseur MLI (A)

U_m : Tension de de magnétisation à vide (V)

i_{sd} : Courant statorique sur l'axe d (A)

i_{sq} : Courant statorique sur l'axe q (A).

i_{rd} :Courants rotorique sur l'axe d (A).

i_{rq} : Courant rotorique sur l'axe q (A).

i_{sa}, i_{sb}, i_{se} : Courants statoriques (A).

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

i_{md} :Courant mutuel sur l'axe d (A).

i_{mq} : Courant mutuel sur l'axe q (A).

itd : Composante directe du courant dans le filtre (A).

i_{sq} : Composante en quadrature du courant dans le filtre (A).

V_{sd} : Tension statorique sur l'axe d (V).

v_{sq} : Tension statorique sur l'axe q (V).

v_{rd} : Tension rotorique sur l'axe d (V).

v_{rq} : Tension rotorique sur l'axe q (V).

v_{sa} v_{sb} v_{sc} : Tensions d'alimentations des phases statoriques (V).

v_{ra} , v_{rb} , v_{rc} : Tensions d'alimentations des phases rotoriques (V).

C : Capacité du bus continu (Farads).

k_{ϕ} : Facteur de saturation magnétique.

Φ_{sd} : Flux statorique sur l'axe d (Wb).

Φ_{sq} : Flux statorique sur l'axe q (Wb).

Φ_{rd} : Flux rotorique sur l'axe d (Wb).

Φ_{rq} : Flux rotorique sur l'axe q (Wb).

Φ_{md} : Flux mutuel sur l'axe d (Wb).

Φ_{sa} : Flux mutuel sur l'axe q (Wb).

θ_s , θ_r : Déphasage du 1^{er} axe direct par rapport au stator et rotor.

$\omega_s = d\theta_s/dt$: Pulsation statorique (Rad/s).

$\omega_p = d\theta_p/dt$: Pulsation rotorique (Rad/s).

ω_e : Pulsation électrique de la MADA.

R_f : Résistance du filtre RL (Ω).

L_f : Inductance de filtre RL (Ω).

R_s : Résistance d'une phase statorique (Ω).

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

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

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

L_m : Inductance de magnétisation saturée (H).

L_{sr} : Inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique (H).

v_{RL} : Tension de sortie du filtre RL (V).

i_{md} : Courant de sortie du filtre RL (A).

E_s : f.e.m au stator.

E_r : f.e.m au rotor.

N_s : Nombre de spires des enroulements statoriques.

N_r : Nombre de spires des enroulements rotoriques.

S_s : Puissance apparente au stator.

S_r : Puissance apparente au rotor.

P_s : puissance active de stator.

Q_s : puissance réactive de stator.

Abréviation	Signification
--------------------	----------------------

FOC	Field orientation control
-----	---------------------------

PLL	Phase Lock Loop
-----	-----------------

DFIG	Doubly Feed Induction Generator
------	---------------------------------

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
------	--

CCM	Convertisseur coté MADA
-----	-------------------------

CCR	Convertisseur coté réseau
-----	---------------------------

D	Diode
---	-------

MPPT	Maximum Power Point Tracking
------	------------------------------

IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
------	-----------------------------------

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
-----	-----------------------------------

PWM	Pulse With Modulation
PI	Proportionnel et Intégral
GTO	Gate Turn-off thyristor

Introduction générale

L'énergie, le vrai sujet brûlant dont l'univers est inconnu depuis longtemps. C'est clair notre dépendance aux combustibles fossiles ne peut pas durer indéfiniment, en particulier dans les sources d'énergie traditionnelles sont de plus en plus épuisées. Ceux-ci ce dernier est principalement une source fossile, provoquant une dégradation continue environnement et écosystème mondial.

En outre, la demande mondiale d'électricité continue d'augmenter, forçant certains pays développés utilisent des centrales électriques pour compenser les pénuries d'énergie nucléaire. L'énergie nucléaire a l'avantage indéniable de ne pas provoquer de pollution atmosphère, mais risque d'accident, d'élimination et d'enfouissement des déchets question très pratique. Cela rend cette énergie de moins en moins attrayante pour l'avenir.

Face à ce dilemme, il faut faire appel à d'autres sources d'énergie au lieu d'il est non polluant et inoffensif pour l'homme et l'environnement. Par conséquent, afin de protéger les problèmes environnementaux causés par les combustibles fossiles tout en assurant Approvisionnement énergétique continu, gouvernements de la plupart des pays du monde a commencé à développer et à utiliser des énergies renouvelables : Énergie solaire, éolienne, biomasse, géothermie, marémotrice, etc. Actuellement, l'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus populaires pour la production d'électricité, il peut être utilisé dans les zones reculées ainsi que sauvegardez le réseau connecté. Cela peut être un choix compétitif qui aide réduire la demande toujours croissante d'électricité. Développement et l'utilisation accrue des chaînes de conversion de l'énergie éolienne a conduit aux industriels et les scientifiques investissent pour améliorer les indicateurs techniques et économiques et la qualité de cette transformation.

L'objectif de notre travail est l'études des convertisseurs de l'électroniques de puissance appliqués à l'énergies éolien du point de vue de commande.

Dans le premier chapitre on va présenter des généralités sur les l'énergies éolien et l'architecteur de ces composants avec les types d'éoliens et ces avantages et ces inconvénients et les machines électriques associées à la conversion d'énergie

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

Introduction

En plus d'être épuisable l'énergie fossile est un facteur responsable du réchauffement climatique qui est très néfaste pour la plante, d'où l'urgence d'une transition vers des énergies plus propres et renouvelables. Parmi ces énergies propres, on trouve ; l'énergie éolienne qui est l'objet d'étude de ce travail.

Dans ce premier chapitre, une recherche bibliographique est effectuée, et qui vise à définir toutes les notions en lien avec la conversion d'énergie éolienne, à savoir : sa définition, la constitution des éoliennes, leur différente technologie, les stratégies de fonctionnement (vitesse fixe et variable) etc.

1. Le potentiel éolien

L'énergie éolienne a pour origine le mouvement des masses d'air chauffées par les rayons du soleil. En effet une différence de pression entre les masses d'air chaudes et les masses d'air froides créent leur mouvement qu'on appelle le vent.

Fin 2004, la capacité mondiale de production d'énergie éolienne atteignait 48 GW, Ce qui représente 0,57% de l'approvisionnement total en électricité dans le monde. Ce nombre ne semble pas impressionnant, mais comparé aux autres technologies d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est la plus prometteuse. Par exemple, sur le marché européen, l'électricité produite par la conversion de l'énergie éolienne est encore très faible, représentant 2,4% de sa production totale d'électricité. Dans sa nouvelle politique énergétique, l'union européenne a décidé d'utiliser l'énergie éolienne comme principale source de production d'électricité. La part de marché de l'énergie éolienne atteindra 12% d'ici 2020 et 20% d'ici 2030 [1]

L'Algérie compte s'investir dans le domaine de la production électrique par conversion éolienne pour atteindre 3% de la production nationale à l'horizon 2027. Dans ce cadre, le groupe Sonelgaz a confié la réalisation d'une première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW, au groupe français Vergnet. L'énergie produite par cette ferme, sera injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar [2]

Le potentiel éolien de l'Algérie est très diversifié. La carte de la Figure I.1 publiée par le centre de développement des énergies renouvelables (CDER) montre que le sud et surtout dans la région

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

sud-ouest, la vitesse varie entre 4 m / s et 6 m / s, et les zones côtières d'Oran, Bejaïa et Annaba, Tiaret et El Kheiter et la zone bordée par Bejaïa au nord et Biskra au sud si la hauteur de l'éolienne est bien choisie, sont prometteur en termes de production. Cette carte permet de déterminer les meilleures zones venteuses pour l'installation de parcs éoliens qui serviront pour alimenter certaines zones reculées et les rendre autonome énergétiquement.

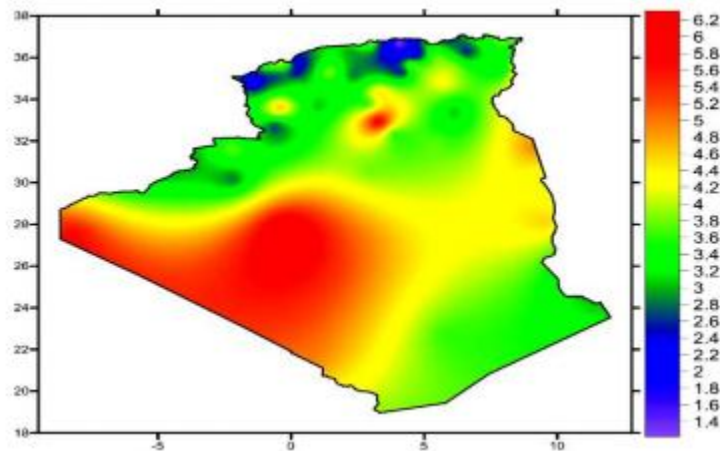


Figure I.1 : Carte du gisement éolien en Algérie (Cder) [1]

2. Définition de l'éolienne :

Une éolienne, est un appareil qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui va faire tourner le rotor d'une génératrice pour transformer cette dernière en énergie électrique qui sera transmise aux consommateurs

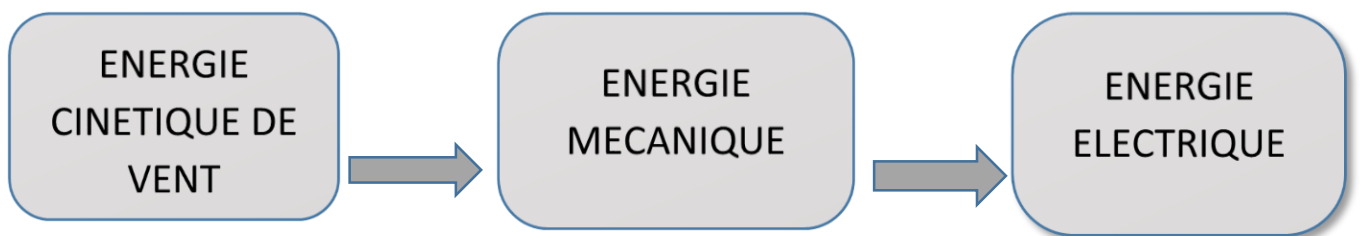


Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

SCE (Système de conversion d'énergie éolienne ou en anglais : Wind Power Conversion System) se compose d'un générateur électrique entraîné par une turbine éolienne à travers un multiplicateur,

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

un système de contrôle, un convertisseur statique, un transformateur et enfin le réseau électrique come illustré à la figure I.2.

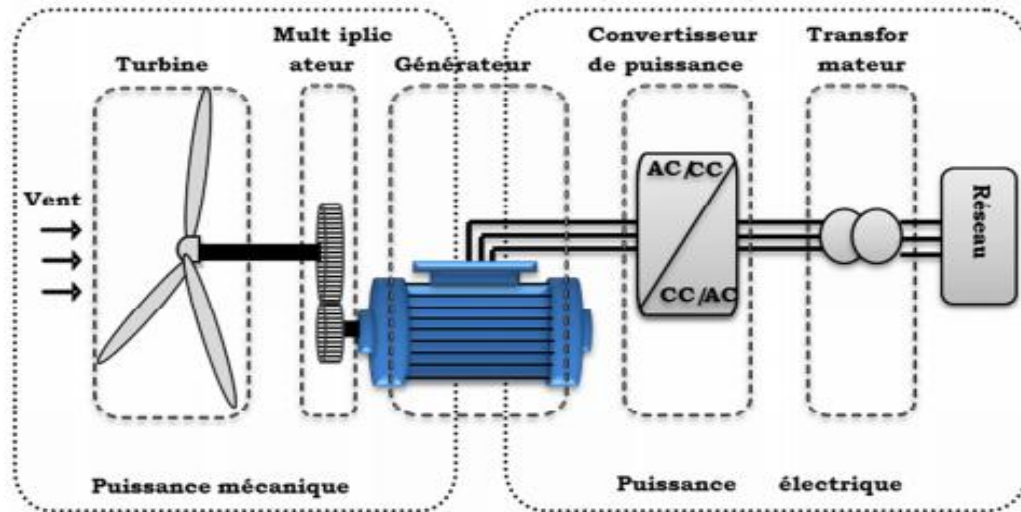


Figure I.2 : Principaux organes du système de conversion éolien. [3]

3. Différents types des éoliennes.

Les éoliennes peuvent être classées en deux types selon la nature de leur axe de rotation en éoliennes à axe horizontal et à axe vertical.

3.1. L'éolien a axe vertical :

Les éoliennes verticales ont été les premières structures utilisées pour la production d'énergie électrique. Plusieurs prototypes sont apparus, mais peu ont réussi la phase d'industrialisation. Ils sont classés en fonction de leurs caractéristiques aérodynamiques en deux familles : les éoliennes conçues sur le principe du levage (turbines à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur un frein (Éoliennes à rotor Savonius : inventées par le Finlandais Siguard Savonius en 1924).

3.1.1. Aérogénérateurs à rotor de Darrieu :

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

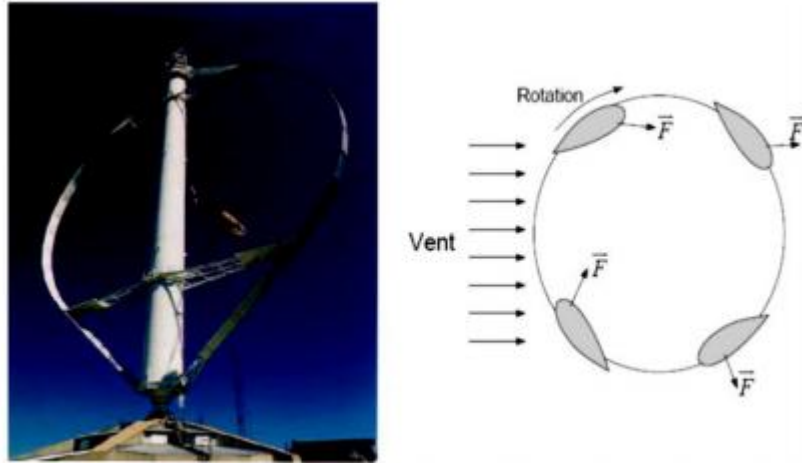


Figure I.3 :Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) [2]

Le principal inconvénient de ce type d'éolienne est qu'il est difficile de la démarrer. En effet, le poids du rotor sur sa base crée des frottements. Il existe de nombreuses variantes autour de ce principe, à partir d'un simple rotor cylindrique à deux contours, les deux rotors sont disposés sur l'autre rotor, et de l'autre côté se trouve un rotor parabolique dont le contour est incurvé en des points opposés et fixé au sommet de l'arbre vertical et au fond (voir figure I.4).

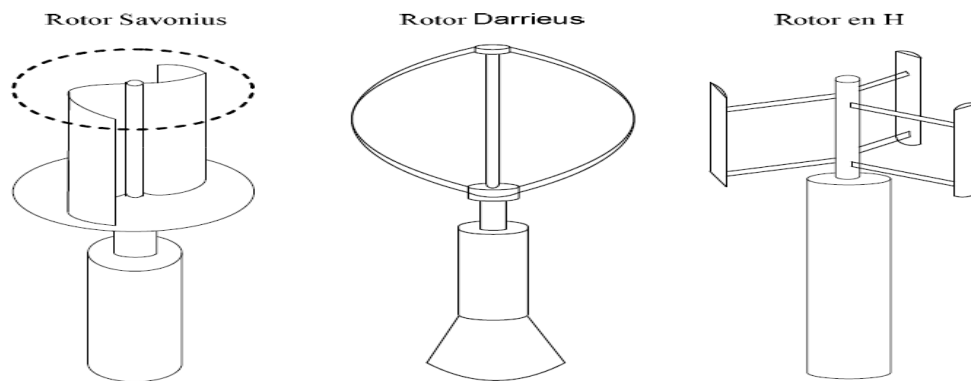


Figure I.4 :Différentes types des éoliennes à axe vertical [4]

Le principal avantage de la machine-outil à axe vertical est que l'équipement de production d'électricité est situé au sol, il n'est donc pas nécessaire de construire une tour. De plus, il fonctionne quelle que soit la direction du vent, il est donc possible de surmonter dispositif d'orientation de la machine.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

3.1.2. Aérogénérateurs à rotor de Savonius :

Il est basé sur le principe de la traînée différentielle qui stipule que le couple du moteur peut être obtenu par différentes pressions exercées par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure.

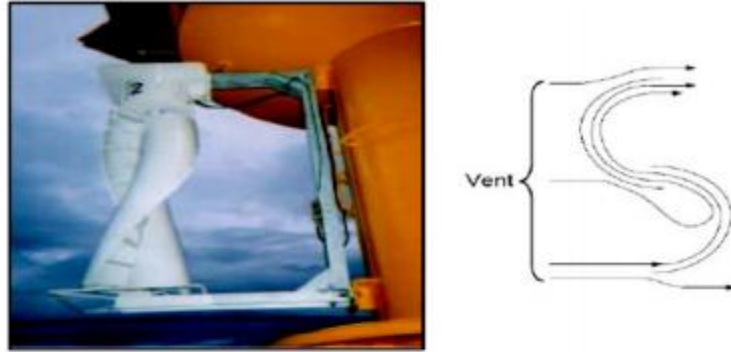


Figure I.5 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius) [2]

3.2. L'éolien à axe horizontal :

Ces machines sont les descendants directs des moulins à vent. Ces machines sont présentes généralement le nombre de pales est de 1 à 3 et peut développer de la puissance élevée (quelques mégawatts). Deux types de configurations peuvent être trouvés : les éoliennes en amont, où les pales sont placées du côté de la tour exposé au vent, et inversement, les éoliennes en aval.

Chaque configuration présente des avantages et des inconvénients : la formule « amont » nécessite des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour, tandis que la configuration aval permet l'utilisation de rotors plus souples. De plus, dans une machine « montée », le flux d'air au-dessus des aubes est légèrement altéré par la présence de la tour. L'effet de masque est plus important avec une machine "descendante". Enfin une machine l'aval peut théoriquement s'orienter dans le lit du vent, tandis que l'éolienne en amont elle doit généralement être orientés à l'aide d'un appareil spécifique. Cependant, nous notons que la plupart des grandes éoliennes adoptent une configuration en amont.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

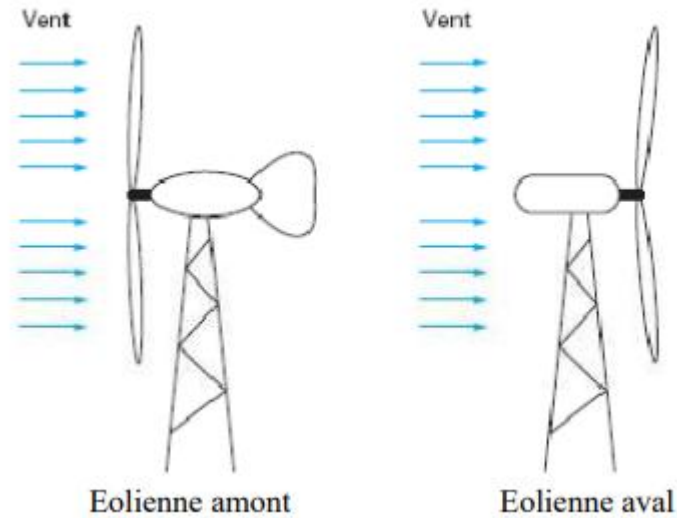


Figure I.6: Configurations à axe horizontal [2]

4. Composants d'une éolienne :

On peut considérer les trois composants de base d'une éolienne, à savoir le rotor, la nacelle et la tour.

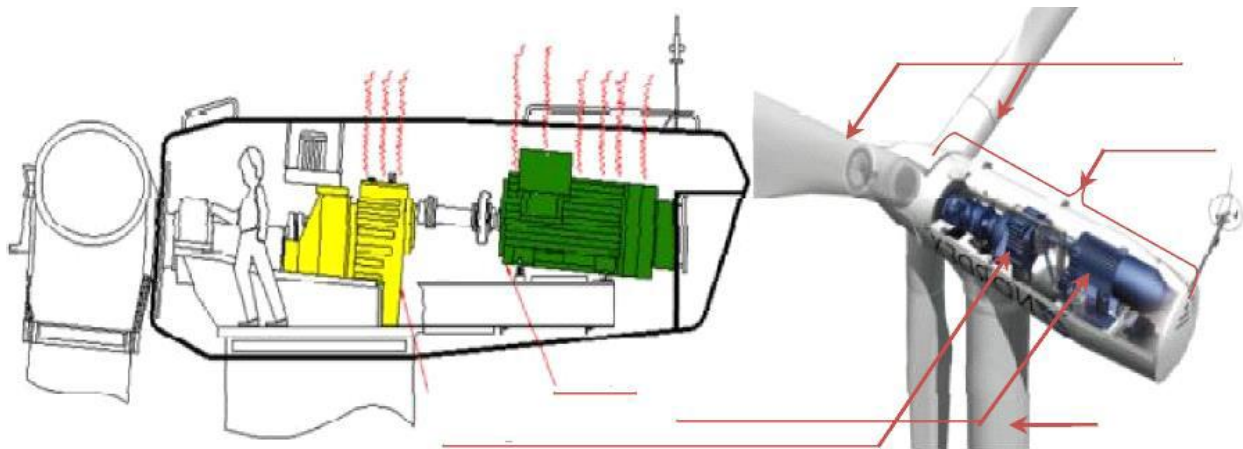


Figure I.7: Composants d'une éolienne à axe horizontal [5].

4.1. Les pales :

Ils sont directement exposés aux changements du vent qui les font tourner. L'énergie éolienne interceptée est contrôlée de deux manières : Inspection de la surface exposée au vent par la méthode PITCH, dont elle consiste à ajuster l'angle d'exposition des pales à la vague de vent incidente. Contrôle STALL de cette zone, qui consiste en une variation de l'angle d'inclinaison de la pale qui entraîne un décrochage aérodynamique et une décélération de la pale.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

4.2. Le rotor

Il s'agit de la partie tournante d'une éolienne. Il capture et convertit l'énergie éolienne en énergie mécanique. Il se compose de pales (avec un nombre variable) et d'un arbre principal, le soi-disant la connexion entre ces éléments est assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre principal qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif de guidage des conduites hydrauliques entre la nacelle et le moyeu. Cette plomberie est notamment utilisée pour régler le fonctionnement de la machine (course de lame variable, freinage du rotor).

4.3. La nacelle

Sa fonction est d'accueillir les équipements de production d'électricité et ses équipements périphériques. Selon le type de machine, différentes configurations peuvent être rencontrées. Il se compose des éléments suivants : Multiplicateur de vitesse, arbre intermédiaire, générateur, contrôleur électronique, divers dispositifs de refroidissement et dispositif de positionnement de nacelle.

5. Modes de fonctionnement des éoliennes :

L'énergie cinétique du vent captée par les pales est convertie en énergie mécanique. Cette la fonction de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique fournie par un générateur type synchrone ou asynchrone.

5.1. Les éoliennes à vitesse fixe :

Les premières éoliennes de grande capacité mises en œuvre sont basées sur l'utilisation machine à cage asynchrone directement connectée au réseau électrique (Figure I.8). Cette machine est alimentée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante grâce au système d'orientation des palettes (contrôle d'inclinaison). La machine tourne alors en hyper synchronisme à la vitesse $\Omega_s (1 - g)$ à la vitesse de synchronisation Ω (souvent $n_s = 1500 \text{ tr / min}$) et g glissement, avec $g < 0$ pour le fonctionnement du générateur et $|g| \leq 1\%$ dans le moteur. Rotation des pales au moyen d'actionneurs hydrauliques ou électriques, permet d'augmenter l'angle de coin β . La puissance peut alors être limitée à puissance nominale du générateur. Lors de vents forts, cette technique permet drapeau de lame ($\beta = 90^\circ$).

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

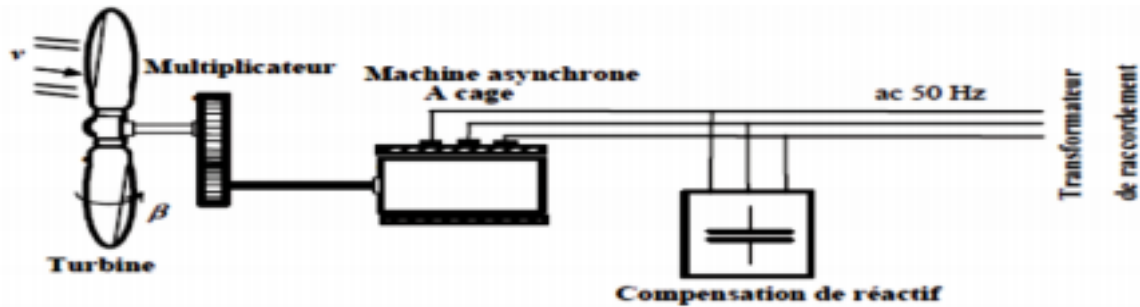


Figure I.9 : Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne [2].

La conception des éoliennes à vitesse constante est fortement liée aux caractéristiques aérodynamique et mécanique. Le temps de réponse de certaines de ces pièces est dans les limites plage de dix millisecondes. Par conséquent, en cas de rafales de vent, vous pouvez observer un changement rapide et significatif de la puissance électrique générée.

Cette configuration présente les inconvénients suivants :

- Un appareil qui consomme l'énergie réactive nécessaire à l'aimantation de machine asynchrone,
- Fort, en raison de la modification du système d'orientation de la lame tendu, changements fréquents du couple mécanique causés par le mouvement des lames maintenir une vitesse constante, ce qui provoque des changements rapides de courant dans le réseau, il n'est pas possible d'ajuster la puissance générée.

Les principaux avantages de ce type :

- Système électrique plus simple.
- à bas prix.
- Aucun système électronique requis.
- Plus fiable (moins d'entretien).

5.2. Les éoliennes à vitesse variable :

En fonction du facteur de puissance par rapport aux courbes, une adaptation de la vitesse est nécessaire. En effet, si le générateur électrique est de type synchrone ou asynchrone connecté directement au réseau, la vitesse est fondamentalement constante et les performances aérodynamiques peuvent être au maximum d'une vitesse du vent (λ_{opt}).

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

La figure I.10 montre que la position de la courbe de puissance maximale en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Généralement, un contrôle de vitesse direct ou indirect est nécessaire pour optimiser la transmission de puissance en conséquence. Il existe différents groupes de machines à onduleur utilisées ou adaptées à une utilisation dans la production d'énergie éolienne.

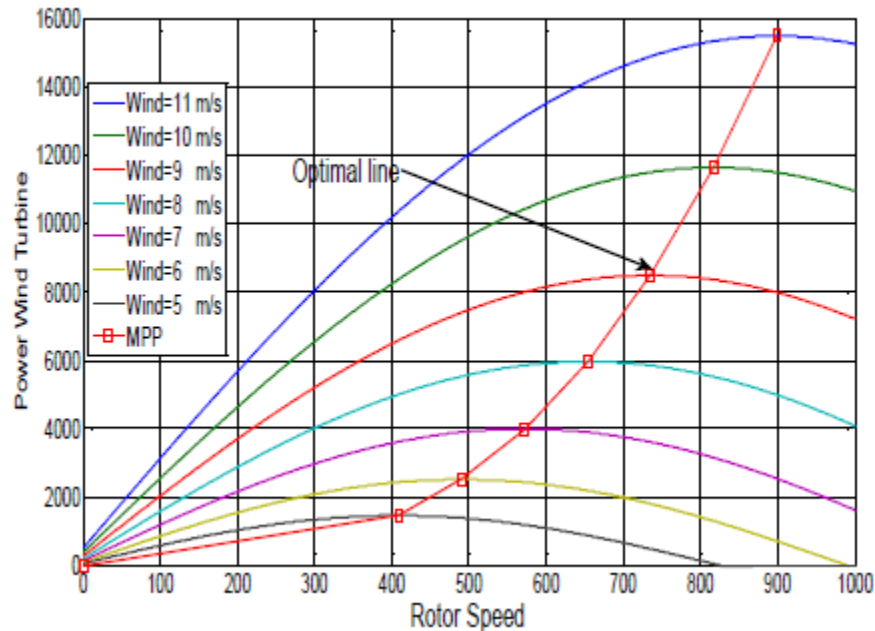


Figure I.10 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne [6]

- **Avantages :**

- Optimisation de l'énergie obtenue grâce à la possibilité de contrôler la vitesse de rotation du rotor.
- Contrôle de la transmission de l'énergie et de l'énergie propre envoyée au réseau.
- Réduction des contraintes mécaniques dans le système d'entraînement. Les turbulences et les rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée par le vent est ainsi stockée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple.
- Production d'électricité de meilleure qualité.
- Obtention d'une plus grande constante de temps du système de réglage de l'angle de coin, ce qui réduit sa complexité
- Réduction du bruit acoustique.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

- **Inconvénient:**

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus élevés (convertisseur, commande, etc.).
- La complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion de la transmission de puissance entre les convertisseurs et positionnement de l'éolienne au point de puissance optimal.

Une courbe typique montrant la puissance aérodynamique d'une éolienne à vitesse variable en fonction de la vitesse du vent est présentée à la Figure I.11.

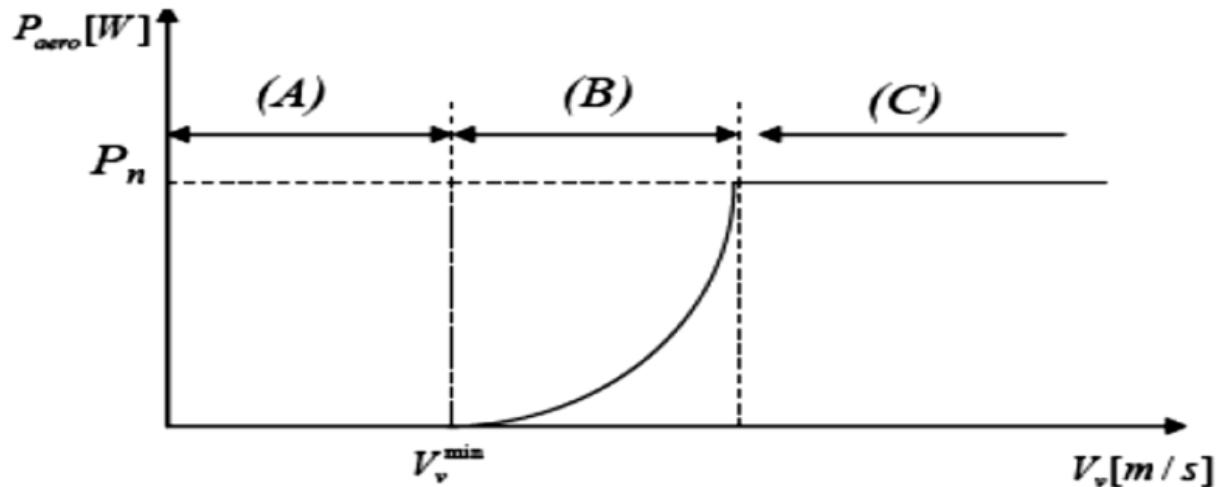


Figure I.11 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne [6].

Il existe trois domaines opérationnels :

- La zone A correspond à des vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner une éolienne et générer de l'énergie.
- La zone B correspond aux vitesses moyennes auxquelles le système de contrôle de l'éolienne peut intervenir pour contrôler l'électricité produite.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

- La zone C correspond à des vitesses de vent très élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter d'endommager la structure. Par conséquent, la puissance électrique générée est maintenue constante et égale à sa valeur nominale.

6. Générateurs électriques

De nombreux types de générateurs électriques sont utilisés dans les systèmes de conversion force du vent à vitesse constante ou variable. Ici, nous allons couvrir le plus souvent dans l'industrie éolienne :

- générateurs de cage asynchrones.
- générateurs synchrones.
- générateurs asynchrones à rotor bobiné.

6.1. Générateurs asynchrones à cage d'écureuil

La machine asynchrone a été le premier type de générateur à être utilisé dans les éoliennes de grande puissance et présente certains avantages en raison de sa conception simple, de sa production peu coûteuse, de sa durabilité, de son faible poids, de sa faible inertie et de ses faibles coûts d'exploitation. Entretien (pas de système d'assemblage de brosses) requis. De plus, la connexion directe du stator au réseau réduit le besoin d'équipements électroniques. Une éolienne à vitesse constante est constituée d'une machine à cage asynchrone qui est reliée mécaniquement à l'éolienne par un multiplicateur (Fig I.12). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est quasi constante par un système de guidage mécanique de la lame (contrôle du volume). La machine fonctionne dans l'état hypersynchrone, c'est-à-dire que le glissement est $g < 0$.

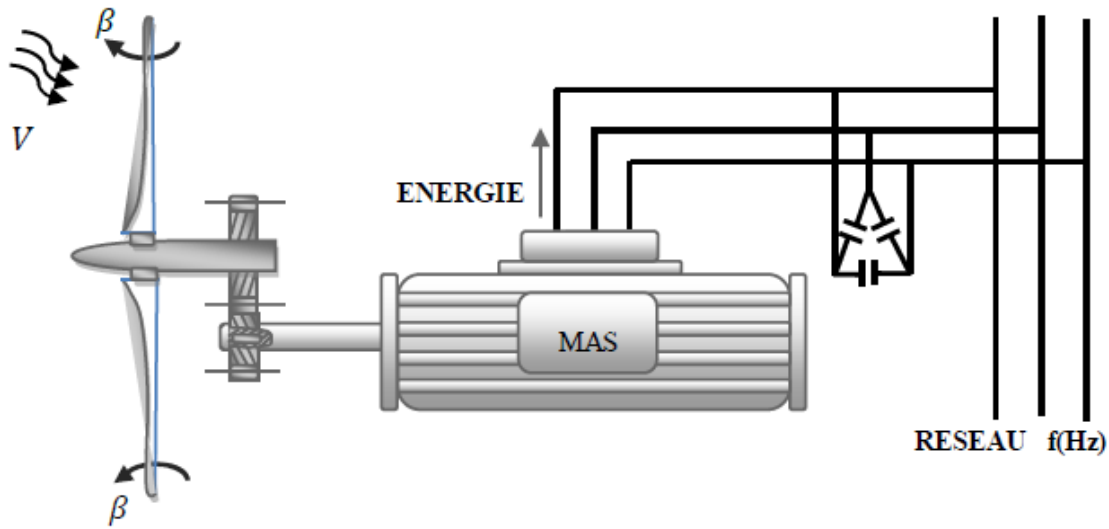


Figure I.12 : Système éolien à base de machine asynchrone à cage d'écureuil. [5]

6.2. Générateurs asynchrones à double alimentation

À l'heure actuelle, en raison de ses différentes configurations, les générateurs asynchrones à double puissance sont devenus les générateurs à vitesse variable les plus largement utilisés dans la production d'unités de plus de 1 MW.

6.3. Générateurs asynchrones à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration est illustrée à la Figure 14 où le stator est connecté directement au réseau, et le rotor est connecté à un redresseur à diodes, à la sortie duquel il est connecté un hacheur à l'IGBT qui fournit une charge résistive.

L'idée est d'obtenir un mode à vitesse variable, c'est par le changement puissance de glissement dissipée par les enroulements du rotor. Cette puissance dissipée permet un glissement maximum de 10%. Le changement de l'énergie dissipée du rotor est accompli en influençant le cycle de service de commande IGBT de l'hacheur. Si le glissement devient important, la puissance tirée du rotor est importante et se dissipe complètement dans la résistance R, ce qui affecte le rendement du système. De plus, il augmente la puissance passant à travers convertisseur, ainsi que la taille de la résistance.

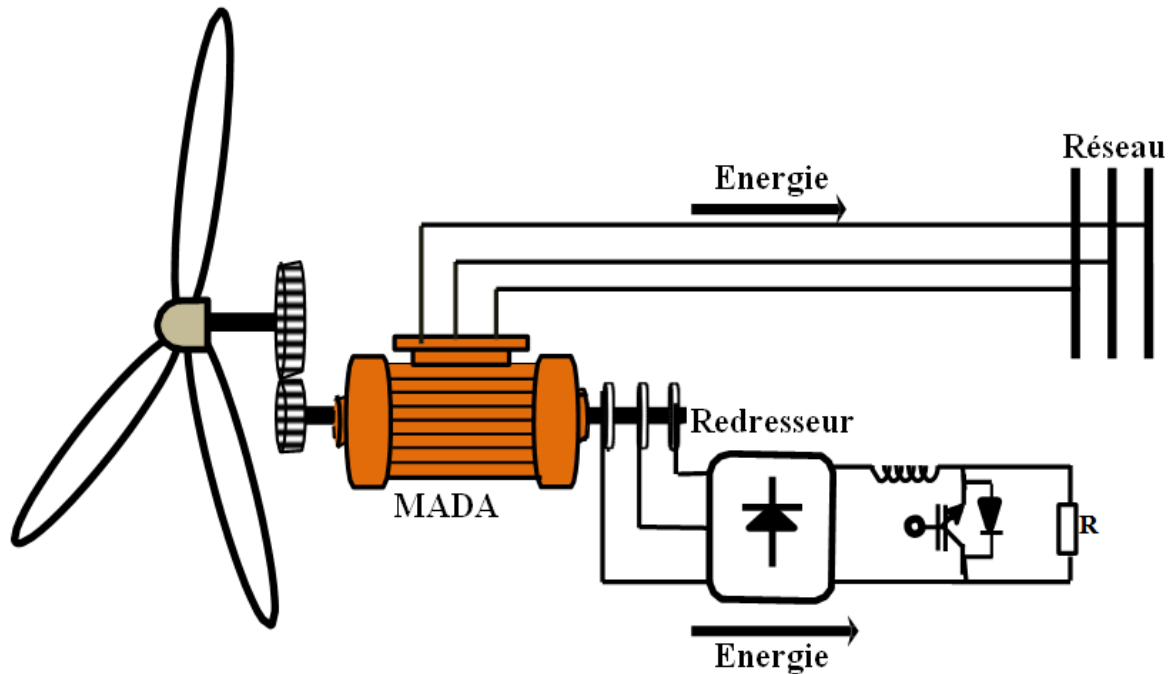


Figure I.13 :Système éolienne à base de MADA à énergie rotorique dissipée [4].

6.4. Générateurs asynchrones à double alimentation à structure de Kramer

Pour réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, l'hacheur et la résistance sont remplacés par un inverseur qui renvoie l'énergie de glissement vers le soi-disant Les réseaux de structure de Kramer sont illustrés à la FigureI.14. L'ensemble redresseur onduleur est ensuite dimensionné pour une fraction de la puissance machine en cours d'évaluation. Ce système est avantageux pour réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale et est maintenue en dessous de 30%. Utilisation thyristors à l'onduleur, endommagent le facteur de puissance, en outre, le redresseur est unidirectionnel, transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau. Par donc le générateur ne fonctionne qu'en mode hyper-synchrone ($g < 0$), donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. De plus, cette configuration présente un niveau élevé d'harmoniques de courant stator et rotor.

Pour assurer la transmission de puissance dans les deux sens, un redresseur à diode doit remplacer par un redresseur à thyristors. Cette solution vous permet de travailler mode hypo-sync et hyper-sync, mais a toujours une fréquence harmonique courant élevé.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

La présence d'une bobine de lissage à inductance élevée dans l'étage courant continu reste un sérieux inconvénient en termes de coût et de taille du convertisseur.

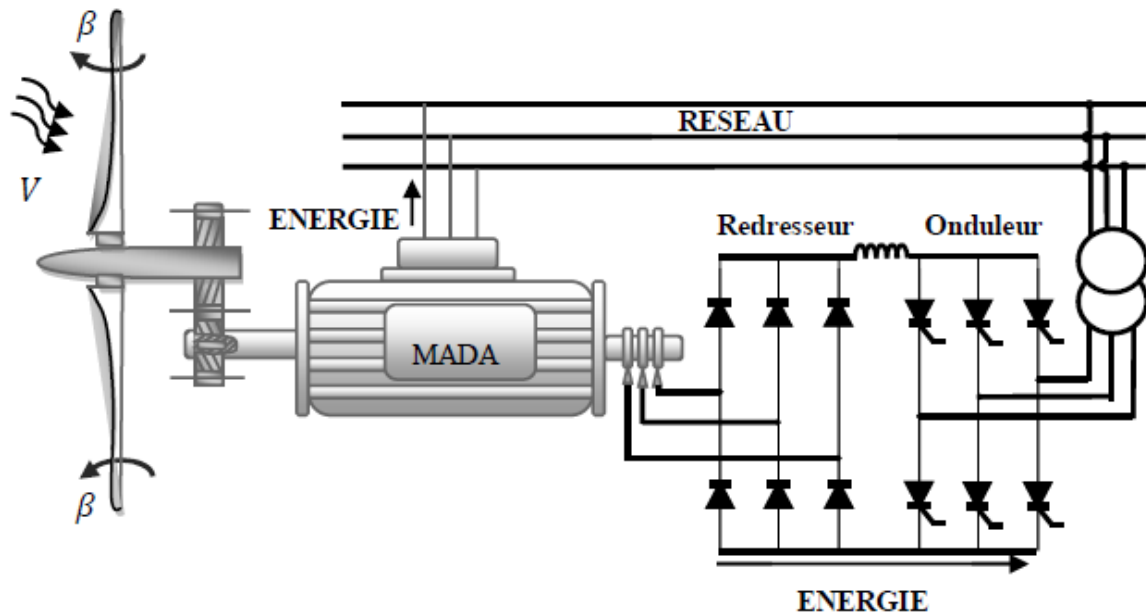


Figure I.14 : Système éolien à base de MADA structure de Kramer [5].

6.5. Générateurs asynchrones à double alimentation avec cyclo convertisseur

Pour permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association le redresseur de l'onduleur peut être remplacé par un convertisseur cyclone (Fig. 15).

La variation de glissement doit être maintenue en dessous de 30% pour maintenir les performances système, ces différences peuvent être positives pour que l'opération hypo-synchrone ou négatif pour un fonctionnement en mode hyper-synchrone.

Le principe de fonctionnement du convertisseur cyclique est de prendre des fractions sinusoïdales du réseau pour reproduire une onde de fréquence inférieure. Par conséquent, son utilisation génère perturbation harmonique importante qui affecte négativement le facteur de puissance de l'équipement. De plus, son coût élevé et la complexité de la commande sont des inconvénients important pour cette configuration. Cependant, les progrès de l'électronique de puissance conduit au remplacement du convertisseur cyclique par une conception à deux convertisseurs pour les IGBT contrôlés par PWM.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

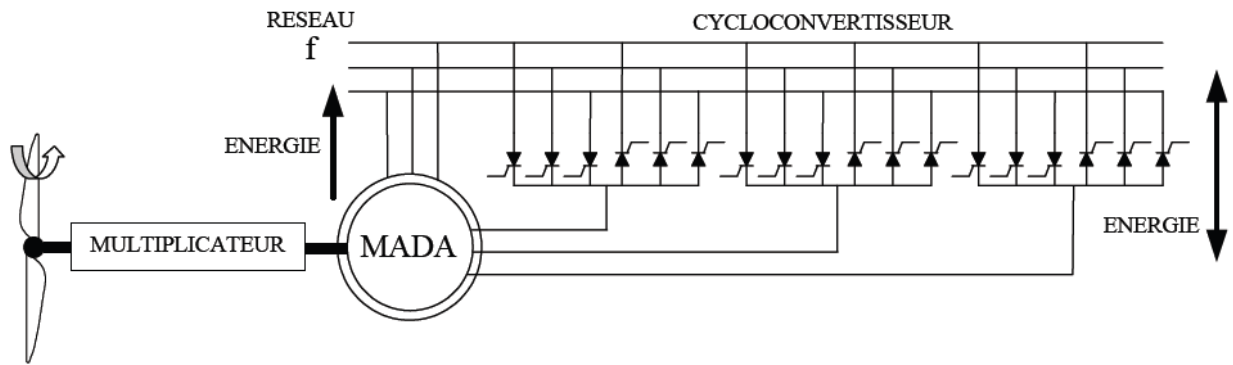


Figure I.15: Système éolien à base de MADA avec cyclo convertisseur [7].

6.6. Générateurs asynchrones à double alimentation à structure Scherbius

Cette configuration est illustrée à la Figure I.16, appelée structure de Scherbius, Il présente les mêmes caractéristiques que la structure Kramer avec redresseur à thyristors. Pourtant l'interrupteur (IGBT) utilisé ici peut être commandé dans les états ouvert et fermé, et leur fréquence de commutation est plus élevée, ce qui permet de se déplacer les harmoniques du courant du rotor dans la direction haute fréquence, favorisant ainsi le filtrage. Bien qu'il existe des contacts glissants qui doivent être régulièrement entretenus et remplacés, La conception de cette configuration est plus traditionnelle et plus simple que d'autres. Plusieurs études récentes ont été confirmées par des réalisations industrielles, montre la fiabilité de l'équipement des éoliennes à vitesse variable.

La bidirectionnalité du convertisseur de rotor permet un fonctionnement hypo synchrone et hyper synchrone et contrôle du facteur de puissance. Mode hyper synchrone fonction permet de générer de l'énergie du stator au réseau et du rotor au réseau.

De nos jours, ce type de convertisseur est couramment utilisé dans les éoliennes avec les caractéristiques suivantes : la puissance est jusqu'à 3 MW. Pour une puissance plus élevée, plusieurs convertisseurs utilisent le niveau. Cette configuration constitue une solution qui s'exécute à vitesse variable tout en garantissant qu'il fonctionne à une vitesse synchronisée.

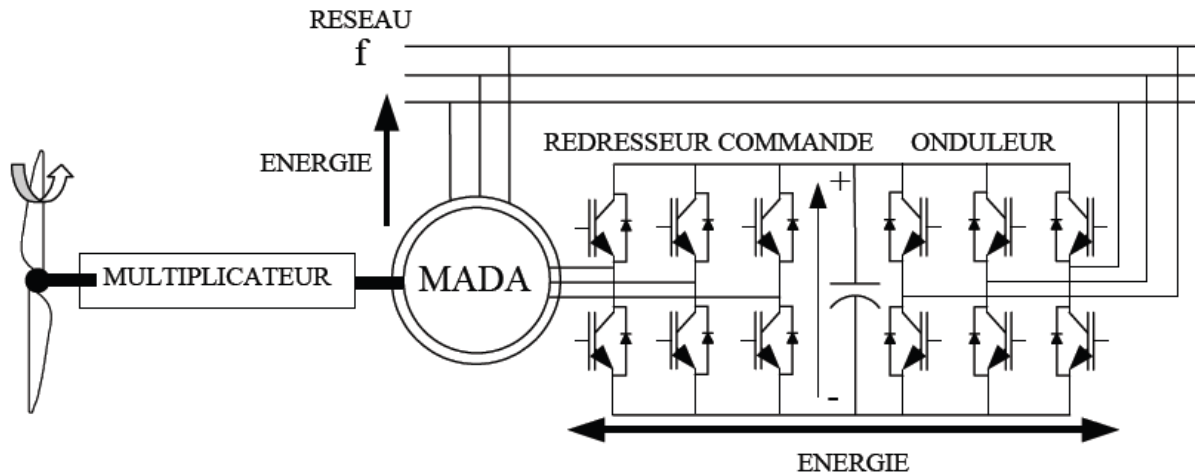


Figure I.16 : Système éolien à vitesse variable à base de MADA structure Scherbius [7]

6.7. Générateurs asynchrones à double alimentation avec convertisseur matriciel

Cette construction, décrite sur la figure I.17 est identique à celle du cyclo-convertisseur. Mais, le convertisseur utilisé ici est direct (pas de degré continu). Ce convertisseur est toute nouvelle génération de convertisseurs, se compose de commutateurs bidirectionnels. À l'entrée, un filtre LC passif est connecté pour filtrer les harmoniques. Ce convertisseur présente plusieurs avantages par rapport aux convertisseurs présentés précédemment :

- pas d'éléments de stockage, ce qui prolonge la durée de vie,
- possibilité de travail hypo-synchrone et hyper-synchrone avec le facteur puissance réglable.
- Ultra rapide.
- fréquence de sortie réglable quelle que soit la fréquence d'entrée.

Bien qu'elles offrent ces avantages, cette configuration est rarement abordée dans la littérature, et les auteurs intéressés par ce type de convertisseur discutent généralement de sa configuration.

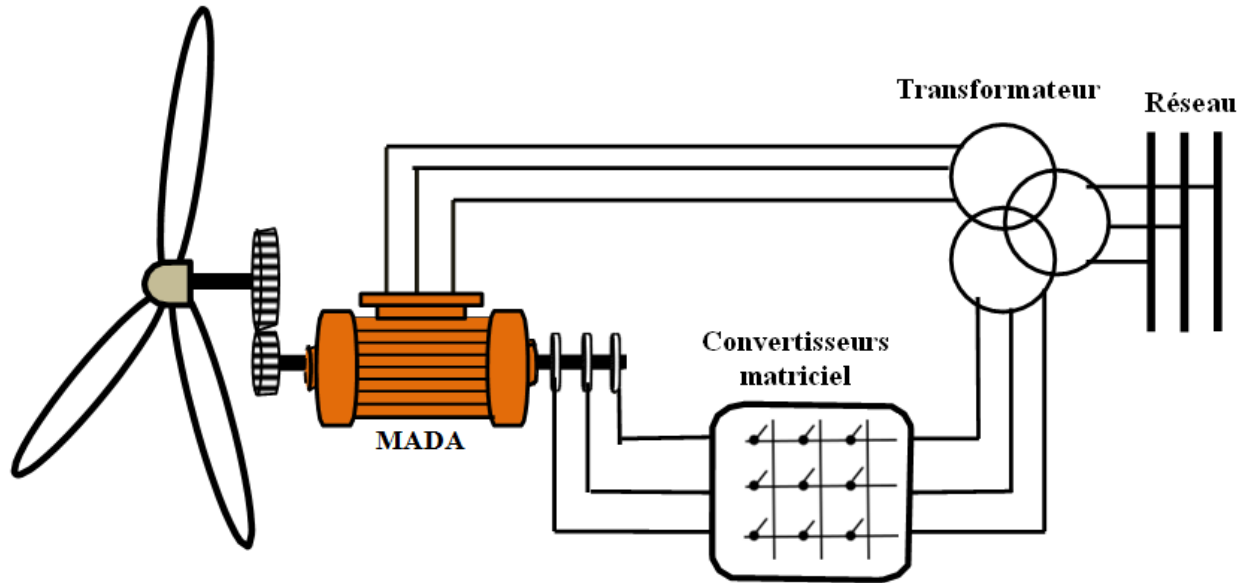


Figure I.17 : Système éolien à vitesse variable à base de MADA avec convertisseurs matriciel. [4]

6.8. Générateurs synchrones

L'inconvénient des éoliennes basées sur des générateurs asynchrones à rotor bobiné est qu'elles nécessitent un système de bagues et de balais et un multiplicateur. Beaucoup de frais de maintenance, en particulier pour les projets offshore situés au milieu marin.

Pour pallier ces inconvénients, certains fabricants ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones avec un grand nombre de paires de pôles et directement couplées à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. Si le générateur est également équipé d'aimants permanents, le système de bagues et de balais est éliminé. L'inconvénient est que la structure représentée sur la figure I.18 est basée sur le fait qu'elle nécessite la connexion au réseau de convertisseurs de puissance adaptés à la puissance nominale du générateur. Cet inconvénient est cependant un avantage en termes de pilotage de l'éolienne. En effet, la connexion au réseau peut être totalement contrôlée par le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté au générateur permet de contrôler la puissance qu'il génère en limitant le réglage du pas à une fonction de sécurité vent fort.

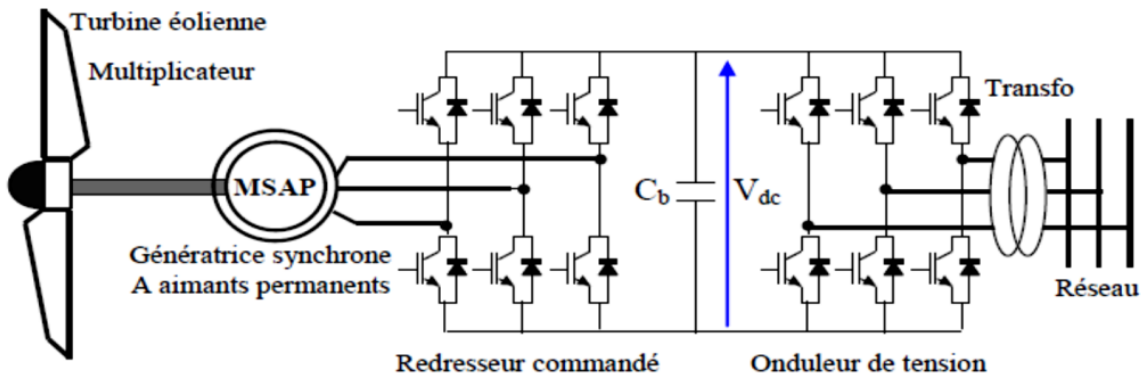


Figure I.18 Système éolien à vitesse variable à base de machine synchrone [8].

6.9. Comparaison des trois générateurs

La machine à cage asynchrone a explosé ces dernières années grâce à l'évolution de l'électronique de puissance et au fait qu'elle est moins chère que les autres machines.

De nos jours, il est souvent utilisé dans les applications à vitesse variable. Les principaux inconvénients de cette machine sont le courant d'appel élevé, des grandeurs non mesurables au niveau du rotor, nécessitant une régulation plus compliquée et la limitation de la plage de variations de vitesse, notamment dans les applications éoliennes.

Cependant, un système utilisant une machine à cage, similaire à celui basé sur MADA. Par ailleurs, les machines à cage asynchrones ont un avantage sur la MADA car celui-ci utilise un système à bagues et balais.

Cependant, un système utilisant une machine à cage, un peu similaire à celui basé sur MADA. Par ailleurs, les machines à cage asynchrones ont un avantage sur MADA car celui-ci utilise un système à bagues et balais.

L'une des principales questions d'actualité sur les lignes de conversion électromécanique pour les éoliennes concernent la comparaison des performances d'une topologie entraînée utilisant directement une machine synchrone (MS) et topologie utilisant un générateur asynchrone double alimentation (GADA). Deux solutions techniques différentes du point de vue des intérêts commerciaux à long ou à court terme. La topologie basée sur la machine synchrone doit utiliser un multiplicateur de vitesse, mais comprend une machine avec un couple plus faible et donc une taille réduite, avec des transducteurs statiques dimensionnés pour ne laisser passer qu'une fraction de la puissance nominale de l'éolienne. Dans l'ensemble, la topologie utilisant GADA a un coût

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

initial inférieur par rapport à une topologie utilisant une machine synchrone à aimants permanents. D'autre part il a un coût de maintenance plus élevé et une efficacité légèrement inférieure en raison des pertes supplémentaires causées par le multiplicateur de vitesse.

Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons constaté les généralités sur les systèmes éoliens et les différents types des éoliennes existantes, leur composants et leur mode de fonctionnement. Nous avons ainsi cité ces avantages et ces inconvénients et ses zones de fonctionnement, et par la suite, on a discuté les générateurs électriques liées à la production d'éolien qui se composé en deux grandes familles : machines asynchrones, machines synchrones. Pour les opérations connectées au réseau, nous avons vu qu'il est important d'étendre le générateur peut fonctionner à vitesse variable et que la présence de convertisseurs entre le générateur et le réseau est nécessaire pour ça.

Bibliographie

- [1] L. FATEH, «Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion,» chez *DOCTORAT 3ème cycle*, ANNABA, 2016.
- [2] T. GHENAM, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation,» *Thèse de Doctorat*, 2011.
- [3] L. M. Tahar, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant,» *Mémoire de Magister*, SETIF, 2012.
- [4] Loucif. M, «Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le,» *DOCTORAT 3ème Cycle*, tlemcen, 2016.
- [5] R. (. ROUABHI, «. Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée,» chez *Doctoral dissertation*, Université de Batna 2, 2016.
- [6] A. ABDELLI, «Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive,» *Doctoral dissertation*, Toulouse, 2007.
- [7] A. Chemidi, «Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une,» *Diplôme De Doctorat*, Tlemcen , 2015.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

- [8] T. GHENNAM, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la,» *DOCTORAT DELIVRE CONJOINTEMENT*, Lille, 2011.
- [9] W. C. a. N. Z. Z. Frede Blaabjerg, *Advanced Control of Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [10] D. B. F. C. W. & Z. N. Xu, *Advanced control of doubly fed induction generator for wind power systems*, John Wiley & Sons, 2018.
- [11] F. B. a. Z. Chen, *Power Electronics for Modern Wind Turbines*, SYNTHESIS LECTURES ON POWER ELECTRONICS, 2006.
- [12] F. POITIERS, «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de,» Nantes, 2003.
- [13] E. S. P. Leconte M. Rapin, «Eoliennes. Techniques de l'Ingénieur,» p. 22, 2001.
- [14] E. S. P. Leconte M. Rapin, *Eoliennes. Techniques de l'Ingénieur, BM 4640*, 2001.
- [15] L. FATEH, «Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion,» *DOCTORAT 3ème cycle*, ANNABA, 2016.
- [16] D. G. L. Johnson, *Wind Energy Systems*, Electronic Edition, 2001.
- [17] L. M. Tahar, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant,» *Magister en Électrotechnique*, setif, 2012.
- [18] Loucif. M, «Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le,» *DOCTORAT 3ème Cycle*, TLEMCEM, 2016.
- [19] H. M. Boulouiha., «Contribution à l'étude et la commande d'une éolienne pour,» *Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de*, Oran , 2013.
- [20] O. A. O. A. D. A. B. L. Louar Fateh, «Modeling and control of a permanent magnet synchronous generator dedicated to Standalone Wind Energy Conversion System,» *Article FIE*, 2015.
- [21] A. Mechernene. M. Loucif A. Boumediene, «Modeling and control of variable speed,» chez *International Electrical and Computer Engineering*, Setif, Algeria, 2015.
- [22] jean, «Système de régulation et de protection - Wiki Éolienne,» licence Creative Commons paternité partage à l'identique , 09 03 2020. [En ligne]. Available: https://eolienne.f4jr.org/systeme_de_regulation_et_de_protection. [Accès le 19 04 2021].
- [23] T. Azzouz, «Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra),» Université Mohamed Khider-Biskra., 2015.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

- [24] F. Atmane, «Commande Non Linéaire ParDesRégulateursEnMode Glissant D'uneMachine Asynchrone à Double Alimentation(MADA),» Magister en Electrotechnique, Biskra , 2013.
- [25] H. M. Boulouiha, «Contribution a l'étude et la commande d'une éolienne pour,» *Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de*, oran , 2013.

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolien

Chapitre 2 : Modélisation de system éolien

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

1 Introduction :

Afin de bénéficier et de mieux profité des avantages de l'énergie éolienne en termes d'énergie propre et inépuisable, l'énergie cinétique du vent doit être convertie en énergie électrique et pour cela toute une chaine de conversion est mise à disposition.

Cette chaine de conversion est composée de plusieurs éléments importants comme la turbine éolienne, le générateurs et les convertisseurs de l'électronique de puissance. Pour que cette chaine de conversion soit parfaitement fonctionnelle et contrôlée, la modélisation des éléments constituant cette dernière est primordiale. Dans le cadre de nos travaux, nous avons choisi d'étudier une éolienne à vitesse variable.

Ainsi, dans ce deuxième chapitre nous allons en premier temps, nous intéresser à la modélisation de la partie mécanique de la chaine de conversion de l'éolienne qui est la turbine et ses composants, ensuite nous allons présenter la stratégie de commande de l'éolienne. A la fin de ce chapitre, les résultats de simulation et une conclusion seront présentés.

2 Conversion de l'énergie éolienne:

2.1 Modélisation du vent:

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [1]:

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne,
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales,
- développer et affiner la modélisation du rotor,
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable,
- fournir une aide pour l'implantation des machines.

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par l'équation (II.1) [2].

$$V_{vent}(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{II-1})$$

Avec :

- A : la valeur moyenne de la vitesse du vent,
- a_k : amplitude de l'harmonique de l'ordre k,
- ω_k : pulsation de l'harmonique de l'ordre k,
- i : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

1.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Une éolienne est un appareil qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une rangée de zones de densité est déterminée par la vitesse V du vent de la longueur dx de la section S est représentée sur la Figure (1):

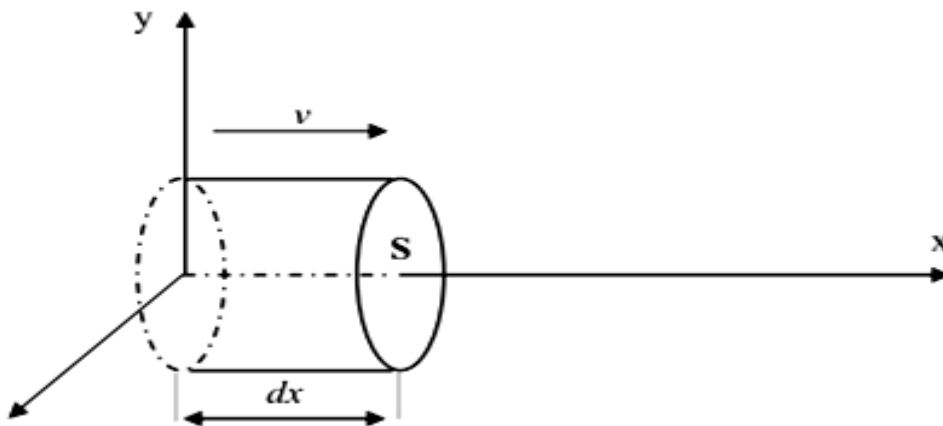


Figure II.1 : Représentation d'une colonne d'air [3].

Par conséquent, l'énergie cinétique de cette colonne d'air de longueur dx est :

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

$$dE = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot V_{vent}^2 \quad (\text{II-2})$$

Avec $dm = \rho \cdot s \cdot dl$ masse de cette colonne d'aire

Or nous savons que : $V_{vent} = \frac{dl}{dt}$

D'où

$$dE = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \cdot dt \quad (\text{II.3})$$

Par conséquent, nous dérivons l'expression de la puissance disponible :

$$P_{vent} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II.4})$$

Avec

- ρ : masse volumique de l'air [$\text{kg}=\text{m}^3$],
- V_{vent} : vitesse instantanée du vent [m/s],
- R : rayon de pale [m],
- E : Energie cinétique [J].

L'énergie éolienne fait référence à l'énergie cinétique à travers une certaine quantité d'air récupérable d'une surface ($S = \pi \cdot R^2$). La puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II-5})$$

1.2. Théorie de Betz:

La théorie de Betz stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula cette loi pour la première fois [4]. Considérons le système de la figure 2 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

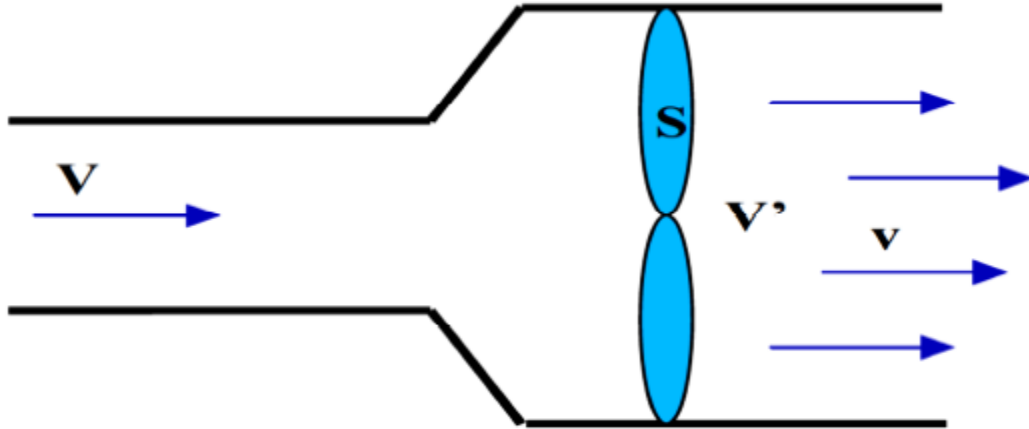


Figure II.2 : Tube de courant autour d'une turbine éolienne [5].

La masse d'air en mouvement traversant le tube en une seconde est donnée par : Le produit de la densité de l'air, de la surface et de la vitesse moyenne.

$$m_0 = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_{1\text{ vent}} - V_{2\text{ vent}})}{2} \quad (\text{II-6})$$

La différence entre l'énergie éolienne amont et aval est la puissance active extraite par le rotor de pale.

$$P_m = \frac{m_0 \cdot (V_{1\text{ vent}}^2 - V_{2\text{ vent}}^2)}{2} \quad (\text{II-7})$$

En remplaçant m_0 par l'expression dans (II-1):

$$P_m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_{1\text{ vent}}^2 + V_{2\text{ vent}}^2) \cdot (V_{1\text{ vent}} - V_{2\text{ vent}})}{2} \quad (\text{II-8})$$

En mettant $V_{2\text{ vent}} = 0$ dans l'expression (II-9), la puissance totale théoriquement obtenue sur la surface S peut être extraite sans réduire la vitesse du vent :

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_{1\text{ vent}}^3}{2} \quad (\text{II-9})$$

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

2. Modélisation du système de conversion de l'énergie éolienne

2.1. Hypothèses simplifiées du modèle mécanique de la turbine :

Les modèles les plus fréquemment rencontrés en recherche électromécanique sont relativement simples et suivent les hypothèses simplifiées suivantes :

- On suppose que la vitesse du vent est uniformément répartie sur toutes les pales, ce qui permet de traiter toutes les pales comme un seul et même système mécanique.
- Le coefficient de frottement de l'air (c_d) de la pale est très faible et peut être ignoré.
- Les pertes par frottement du rotor de turbine sont considérées comme négligeables par rapport aux pertes par frottement côté générateur.

La figure II.3 montre la configuration du système testé consistant en une éolienne entraînant le générateur à travers le multiplicateur de vitesse.

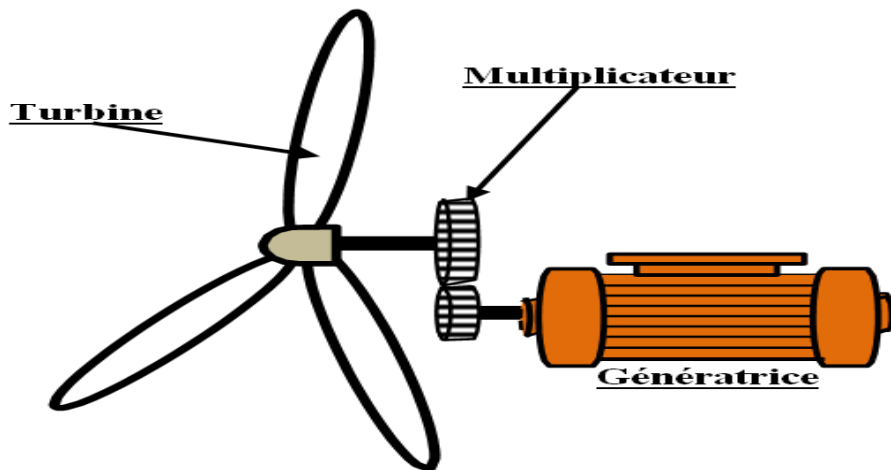


Figure II.4 : Configuration d'un système de conversion de l'énergie éolienne [6].

2.2. Modèle de la turbine :

2.2.1. Puissance mécanique de la turbine :

La puissance cinétique du vent s'exprime par la relation :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (II-10)$$

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

La relation entre la vitesse du vent et la puissance aérodynamique extraite à partir du vent peut être décrite comme suit [7]:

Avec :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_{vent}^3 \quad (II-11)$$

- P_{vent} : puissance du vent [W],
- P_{aer} : puissance aérodynamique de la turbine de vent [W],
- ρ : densité de l'air [kg/m³],
- R : rayon de la turbine en mètre [m],
- C_p : coefficient de puissance,
- λ : vitesse relative,
- β : angle d'orientation des pales en degré [°],
- V_{vent} vitesse du vent en [m/s].

2.2.2. Coefficient de puissance:

Le facteur de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de l'éolienne, il dépend des caractéristiques de l'éolienne. Ce coefficient est fonction du rapport vitesse de la lame et l'angle d'orientation.

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} \quad (II.12)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

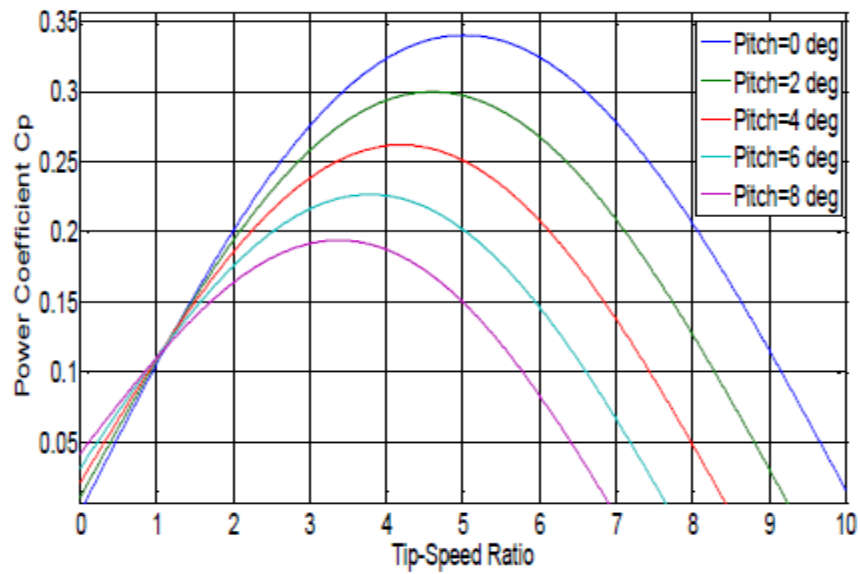
Vitesse relative :

Afin de permettre l'utilisation réelle du coefficient de puissance C_p , nous introduisons la variable appelée vitesse relative est donnée par l'expression suivante :

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

$$\lambda = \frac{\Omega_{\text{turb.}} R}{V_{\text{vent}}} \quad (\text{II-13})$$

Les caractéristiques du coefficient de puissance C_p variant avec l'équation suivante (II-13) Comme le montre la figure II.5.



FigureII.5 : La caractéristique du coefficient de puissance en fonction de λ [8]

En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation. Les courbes caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par les coefficients de puissance C_p et de couple C_m en fonction de la vitesse spécifique λ [8].

2.2.3. Couple mécanique de la turbine :

De l'expression de la puissance générée par la turbine et de la connaissance de la vitesse couple turbine, le couple mécanique s'exprime comme suit :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_{vent}^3 \frac{1}{\Omega_{turb}} \quad (\text{II-14})$$

2.3. Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur convertit la vitesse mécanique de la turbine en vitesse du générateur et le couple aérodynamique au moment d'entraînement du générateur conformément aux formules mathématiques suivantes :

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

$$G = \frac{\Omega}{\Omega_{turb}} \quad (II-15)$$
$$G = \frac{C_{turb}}{C_m}$$

Avec

- G : rapport du multiplicateur,
- C_{aer} : couple aérodynamique de la turbine [Nm],
- ω_{turb} : vitesse de la turbine [rad/s]
- Ω : vitesse de la génératrice [rad/s],
- C_m : couple de la génératrice [Nm].

2.4. Equation dynamique de l'arbre de transmission :

L'équation dynamique de base permet de déterminer le développement de la vitesse mécanique du couple mécanique omis à l'axe du rotor de la turbine éolienne, qui est sur l'axe du rotor de la turbine éolienne et du couple électromagnétique C_{em} :

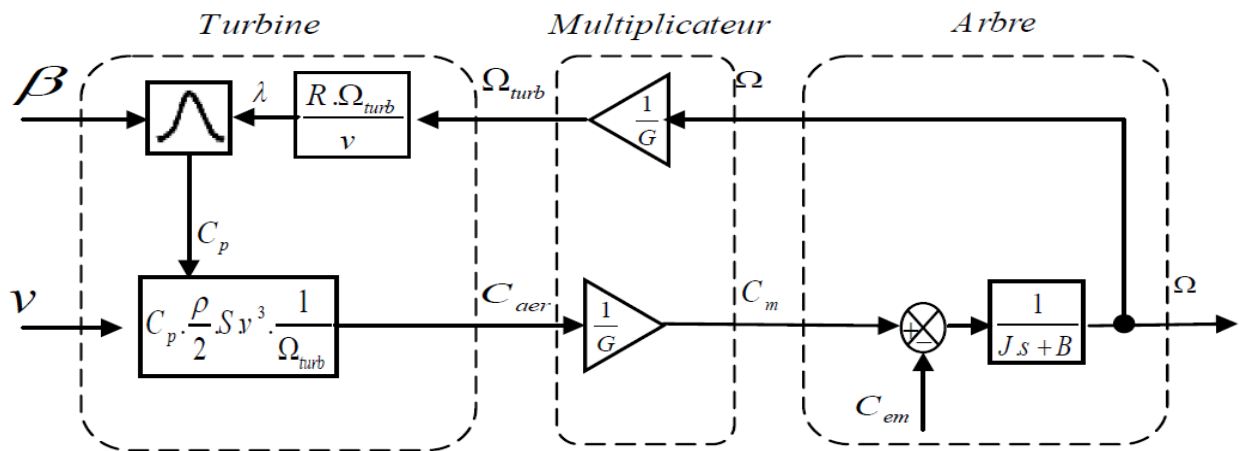
$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - B \cdot \Omega \quad (II-16)$$

L'inertie totale J est composée d'inertie turbine, qui est renvoyée à l'axe rapide et à l'inertie du générateur

$$J = \frac{J_{turb}}{G} + J_m \quad (II-17)$$

Parmi les équations précédentes, le diagramme de bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est donné par la figure II.6.

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien



FigureII.6– Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien [6]

3. Stratégie de la commande d'une éolienne à vitesse variable

3.1. Principe de MPPT :

Le principe de la stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) consiste, pour un angle de pale donné, à ajuster, en fonction de la vitesse du vent V_{vent} , la vitesse de rotation de la turbine éolienne à une valeur de référence Ω_{turb}^* pour maintenir une vitesse relative optimale et donc un coefficient de puissance maximal $C_p \max$ [6].

L'équation de vitesse relative deviens

$$\Omega_{turbopt} = \frac{V_{vent} \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad (\text{II-18})$$

3.2. Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable :

Les différentes étapes du fonctionnement d'une turbine à vent variable de vitesse sont illustrées dans la figure.

- Zone 1 : Correspond aux très faibles vitesses de vent insuffisant pour tourner la turbine éolienne et produire de l'énergie.
- Zone 2: MPPT : Dans cette zone, l'angle de calage est maintenu constant et constitue le contrôle du couple électromagnétique du générateur qui sera implémenté (afin de capturer la puissance

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

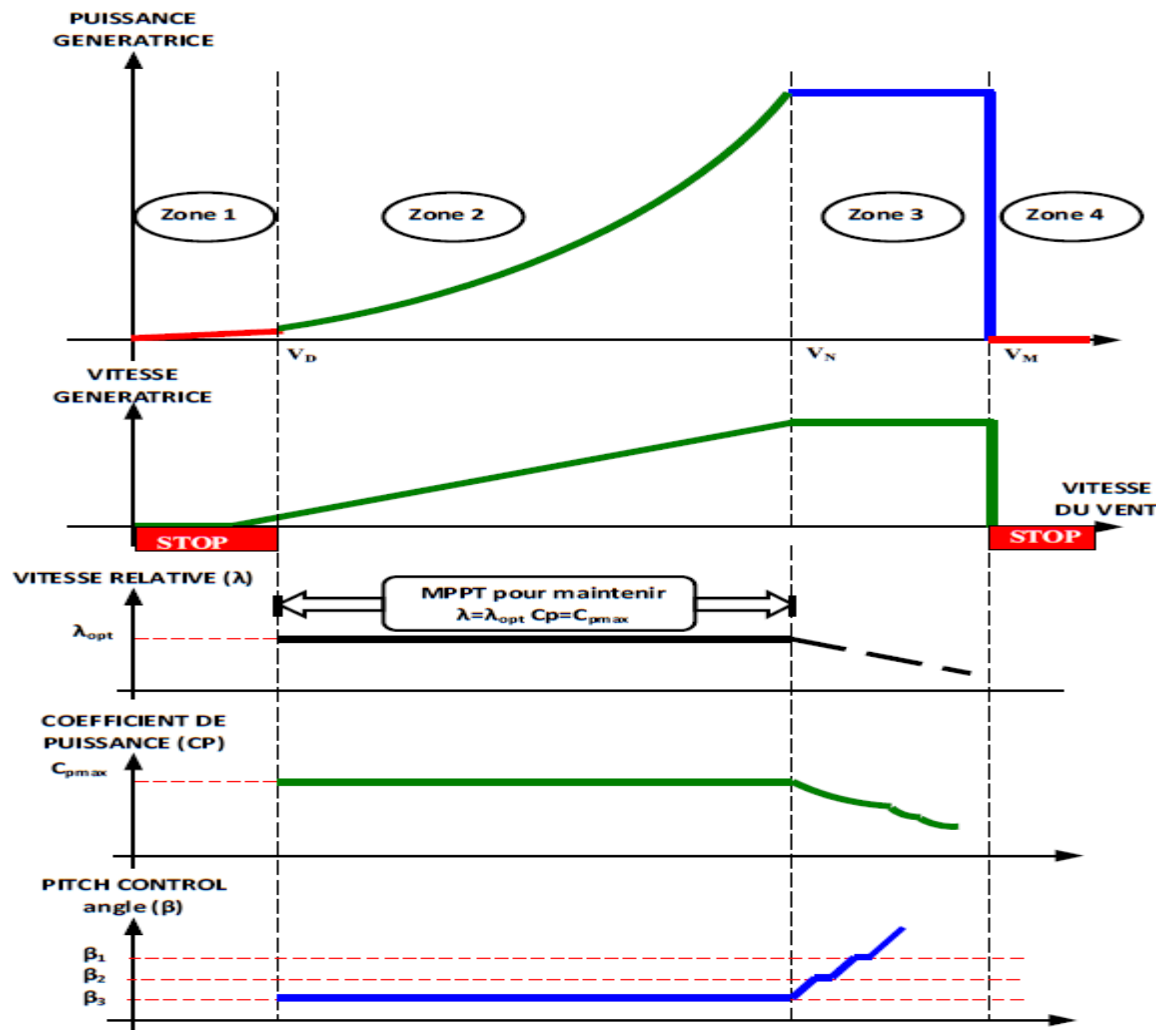
maximale de chaque vitesse du vent (principe MPPT). Dans cette zone, la courbe de puissance du générateur (qui est en fonction de la vitesse du vent dans le cube suit une progression rapide.

-Zone 3 : Ici, la vitesse du générateur est fixée à son maximum par opposition à un couple de moteurs appropriée. L'augmentation de la vitesse du vent sera accompagnée par la décomposition du coefficient de la C_p et d'une augmentation moins rapide de la puissance récupérée. Lorsque la puissance maximale du générateur est atteinte, l'angle des pales (pitch) est modifié (par exemple : changement de 1 à 2) pour continuer le coefficient de la C_p .

- Zone 4 : Dans cette zone, lorsque la vitesse du vent devient très élevée (V_M), un dispositif d'urgence permet d'empêcher la turbine éolienne (production d'énergie arrête) et de la mettre en sécurité pour éviter tout dommage.

Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse de vent est très fort. En particulier l'une des deux techniques de contrôle connues peut être utilisées dans les grandes turbines, le système d'orientation des pales (Pitch control) et le système de décrochage aérodynamique (Stall control).

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien



FigureII.7 : Zone de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.[6]

3.3. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

3.3.1. Système d'orientation des pales (Pitch Control) :

C'est un contrôle par variation de l'angle de calage des pales (pas des pales) autour de leur axe longitudinal en fonction de la vitesse du vent et de la puissance active à extraire. En agissant par le Pitch control, le coefficient de puissance C_p ne varie plus en fonction de λ mais en fonction de la vitesse du vent à vitesse de rotation constante, ce qui va permettre de maintenir la puissance constante dans la zone 4 à sa valeur maximale. On peut noter que pour modifier l'angle de calage dans le Pitch Control dans un système de régulation automatique de vitesse de rotation on a besoin d'un régulateur électronique avec des masselottes centrifuges ou d'un régulateur électronique [9].

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

3.3.2. Système à décrochage aérodynamique (Stall Control) :

Stall Control est un système de régulation aérodynamique passif. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Ce système empêche les pales, qui sont conçues spécialement pour subir des décrochages, d'accélérer en utilisant l'effet Stall qui agit comme un frein par le décrochage aérodynamique au niveau de la pale du rotor. En effet grâce à sa forme, la pale ne peut plus accélérer même si le vent augmente. Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des petites éoliennes car il ne nécessite pas de pièces mobiles ni de système de régulation dans le rotor, c'est un système simple, fiable et moins couteux mais il engendre des pertes d'efficacité au démarrage et dans les grandes vitesses de vent. Cette commande agit uniquement pour limiter la puissance à des vents forts, régulant la puissance à sa valeur nominale ou plus faible. Le fonctionnement à vents faibles reste sans aucune commande donc la puissance obtenue dépend des caractéristiques mécaniques de la turbine et des caractéristiques électriques de la machine. L'utilisation d'une régulation à angles fixes implique un seul point de fonctionnement défini par la vitesse de rotation du rotor et par la vitesse du vent [10].

Certains aérogénérateurs utilisent un système hybride nommé le Stall Actif qui combine les avantages des deux systèmes où le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le cas du système de Pitch Control [9][6].

4. Modèle généralisé d'une MADA

La machine asynchrone triphasée est formée d'un stator fixe et d'un rotor cylindrique mobile. Le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle et sont alimentés par un système triphasé de tensions. Il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine (Théorème de FERRARIS). La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{II-19})$$

ω_s est la pulsation du réseau d'alimentation triphasé du stator, et p est le nombre de paires de pôles de champ magnétique ramenée au stator.

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

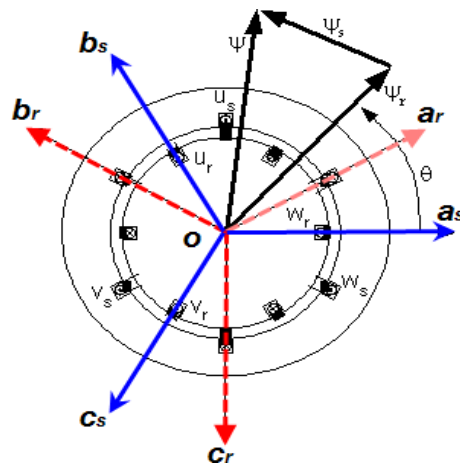


Figure II.8 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique [11]

Le rotor du moteur supporte un enroulement triphasé avec le même nombre de pôles que le stator couplé en étoile. On dit que ce type de rotor est bobiné. La vitesse de rotation du rotor par rapport au stator est :

$$\Omega_{mec} = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II-20})$$

θ : Etant l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique.

La loi de Faraday exprime la relation entre la tension v aux bornes de la bobine de la résistance R_B et l'inductance L_B , le courant i , la variation du flux total Φ_t :

$$\frac{d\phi_t}{dt} = v - (R_B \cdot i) \quad (\text{II-21})$$

$\Phi_t = \Phi + \Phi_c$, où Φ_c est le flux de couplage magnétique avec d'autres enroulements, et Φ est le flux magnétique de l'enroulement lui-même.

4.1. Mise en équation de la partie électrique dans le plan a, b, c

Dans cette partie, nous proposons un modèle général de moteur asynchrone à rotor bobiné, en supposant que la tension rotoriques n'est pas nulle.

4.1.1. Hypothèses simplificatrices :

Le modèle utilisé repose sur les hypothèses simplificatrices classiques suivantes :

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

- entrefer constant,
- effet des encoches négligé,
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices dans l'entrefer,
- l'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte,
- circuit magnétique non saturé (perméabilité constante),
- pertes ferromagnétiques négligeables.[11]

De ce fait, tous les coefficients d'inductances propres sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles ne dépendent que de la position des enroulements.[11]

Si on applique la loi de Faraday aux enroulements de la MAS, les équations déterminent de façon à exprimer les différents flux :

- Le stator :

$$\bullet \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-22})$$

- Le rotor :

$$\bullet \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-23})$$

- v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} et v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} : sont les tensions par phase statoriques et rotoriques de la machine.
- i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} et i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : sont les courants statoriques et rotoriques de la machine;
- $\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$ et $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: sont les flux propres statoriques et rotoriques de la machine.
- R_s est la résistance des enroulements statoriques.
- R_r est la résistance des enroulements rotoriques.

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

On définit le vecteur de flux suivant :

$$[\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

$$[\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-25})$$

Aussi les vecteurs courants

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-26})$$

$$[i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-27})$$

- La forme matricielle des flux :

$$\bullet \begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-28})$$

Ou bien :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} = l_s \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-29})$$

Avec :

- L_s : Inductance propre d'une phase statorique.
- m_s : est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II-30})$$

M_{max} : représente la valeur maximale de l'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les enroulements se font face.

Les équations obtenues sous la forme matricielle :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] &= [v_{sabc}] - [R_s][i_{sabc}] \\ \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] &= [v_{rabc}] - [R_r][i_{rabc}] \end{aligned} \quad (\text{II-31})$$

4.1.2. Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de Park :

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant dont l'orientation est à priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en machine diphasée équivalente.

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ permet de ramener les variables du repère triphasé (a; b; c) sur les axes d'un repère tournant (d; q; 0). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par [11]:

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)][x_{abc}] \quad (\text{II-32})$$

Ou bien :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(p\theta) & -\sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-33})$$

* $\theta = \theta_s$ représente les grandeurs statoriques.

* $\theta = \theta_r$ représente les grandeurs rotoriques.

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

-La figure représente la transformation de Concordia correspondant aux tensions (statoriques et rotoriques).

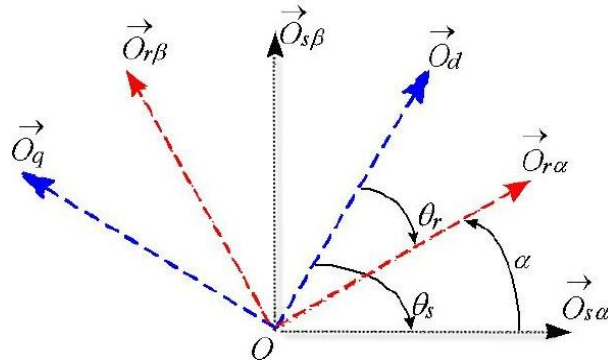


Figure II .9 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique [11].

Il devient alors clair que le déterminant de la transformation de la taille du Park est les valeurs de taille du stator et du rotor doivent coïncider pour simplifier les équations. Ceci est fait en liant les angles :

$$\theta_s = \theta + \theta_r.$$

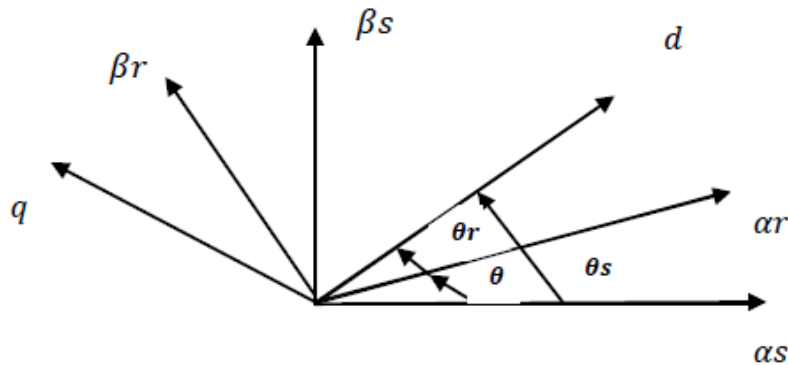


Figure II.10 : Transformation de Park [12]

Le rotor et le stator de la machine, appelés machine de *Park*, tournent à la même vitesse de sorte que les flux et les courants sont liés par une expression indépendante du temps. En appliquant la transformation de *Park* aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel (équations

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

(II-34) et (II-35), un modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires[11].

$$\begin{aligned} [v_{sdqo}] &= [R_s][i_{sdqo}] + \frac{d}{dt}[\phi_{sdqo}] + [\lambda]\phi_{staq} \frac{d\theta_s}{dt} \\ [v_{rdqo}] &= [R_r][i_{rdqo}] + \frac{d}{dt}[\phi_{rdqo}] + [\lambda][\phi_{rdqo}] \frac{d\theta_r}{dt} \end{aligned} \quad (II-36)$$

Avec:

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ou:

$-[v_{sdqo}], [v_{rdqo}]$: représente les vecteurs tensions de stator et de rotor dans le repère de *Park*.

$-[i_{sdqo}], [i_{rdqo}]$: représente les vecteurs courants de stator et de rotor dans le repère de *Park*.

$-[f_{sdqo}], [f_{rdqo}]$: représenter les vecteurs flux de stator et de rotor dans le repère de *Park*.

La relation entre les flux et les courants dans le repère de Park est :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sdqo} \\ \Phi_{rdqo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sdqo} \\ i_{rdqo} \end{bmatrix} \quad (II-37)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - m_s \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r - m_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{bmatrix}$$

$$M = \frac{3}{2} M_{max}$$

Les équations des flux dans ce système d'axes s'écrivent :

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-38})$$

L'expression qui représente Le couple électromagnétique :

$$C_e = \frac{3}{2} P (\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd})$$

Les tensions représentent par :

$$\begin{aligned} v_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ v_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ v_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ v_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \end{aligned} \quad (\text{II-40})$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel permet d'obtenir des grandeurs constantes en régime permanent. Ensuite, il est plus facile de réguler.

Noté que $\omega_s = \frac{d\theta_{abc}}{dt} = \omega_{obs} = \Omega_s$ est la pulsation statorique et $\omega_r = \frac{\Omega_r}{p}$ est la pulsation rotoriques

et

$\omega = \omega_s - \omega_r$ Pulsation mécanique.

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

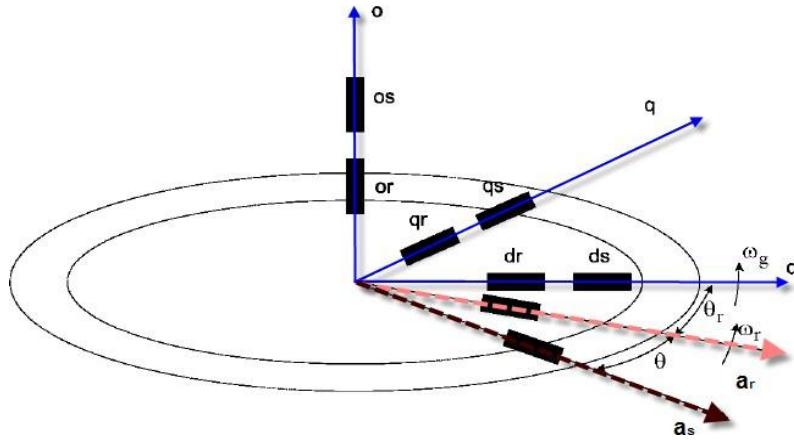


Figure II.11 : Représentation des enroulements de la machine de Park. [11]

4.2. Calcul du couple électromagnétique

Pour trouver la puissance instantanée absorbée par la machine, on calcule la somme des produits de chaque f.e.m. avec son courant :

$$p_m = (e_{sd}i_{sd} + e_{sq} \cdot i_{sq}) + (e_{rd}i_{rd} + e_{rq} \cdot i_{rq}) \quad (\text{II-41})$$

En exprimant cette puissance en fonction du courant statorique et rotoriques et du flux magnétique, et en considérant la vitesse angulaire, on trouve :

$$p_m = (\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd}) \cdot \omega_s + (\phi_{rd}i_{rq} - \phi_{rq}i_{rd}) \cdot \omega_r \quad (\text{II-42})$$

En exprimant le flux en fonction du courant selon les équations (II.17) et (II.18), on voit :

$$\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd} = -(\phi_{rd} \cdot i_{rq} - \phi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II-43})$$

Dans ces conditions, nous avons obtenu deux expressions du couplage électromagnétique :

$$Cem = p(\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II-44})$$

Où

$$Cem = p(\phi_{rq} \cdot i_{rd} - \phi_{rd} \cdot i_{rq}) \quad (\text{II-45})$$

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

5. Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait la modélisation d'un system éolien et on a mis le system sous forme des équations mathématiques. Dans la première partie on a présenté la modélisation de la chaine de conversion tel que la modélisation de vent, la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et la théorie de Betz. La modélisation du système de conversion de l'énergie éolienne avec les équations de turbin et multiplicateur et l'arbre de transmission est aussi présentée dans ce chapitre. Après on a abordé les stratégies de la commande d'une éolienne à vitesse variable et la régulation mécanique de la puissance d'une éolienne (Pitch et Stall contrôle). Finalement on a fait le modèle généralisé d'une MADA et ces équations et la transforme de Park aussi le calcule de couple électromagnétique et les puissances.

Dans le chapitre suivant on va traiter la modélisation et la commande des convertisseurs statiques et la description détaillée de ces composants.

3 Bibliography

- [1] E. S. P. Leconte M. Rapin, «Eoliennes. Techniques de l'Ingénieur,» p. 22, 2001.
- [2] E. S. P. Leconte M. Rapin, Eoliennes. Techniques de l'Ingénieur,, BM 4640, 2001.
- [3] L. FATEH, «Modélisation et simulation d'une chaine de conversion,» *DOCTORAT 3ème cycle*, ANNABA, 2016.
- [4] D. G. L. Johnson, Wind Energy Systems, Electronic Edition, 2001.
- [5] L. M. Tahar, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant,» *Magister en Électrotechnique*, setif, 2012.
- [6] LOUCIF. M, «Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le,» *DOCTORAT 3ème Cycle*, TLEMCEM, 2016.
- [7] H. M. Boulouiha., «Contribution a l'étude et la commande d'une éolienne pour,» *Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de*, Oran , 2013.

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

- [8] Louar Fateh, «Modeling and control of a permanent magnet synchronous generator dedicated to Standalone Wind Energy Conversion System,» *Article FIE*, 2015.
- [9] A. Mechernene. M. Loucif A. Boumediene, «Modeling and control of variable speed,» *International Electrical and Computer Engineering*, Setif, Algeria, 2015.
- [10] Jean.R.Système de régulation et de protection - Wiki Éolienne,» licence Creative Commons paternité partage à l'identique , 09 03 2020. [En ligne]. Available: https://eolienne.f4jr.org/systeme_de_regulation_et_de_protection. [Accès le 19 04 2021].
- [11] T. Azzouz, «Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra),.» Université Mohamed Khider-Biskra., 2015.
- [12] F. Atmane, «Commande Non Linéaire ParDesRégulateursEnMode Glissant D'uneMachine AsynchroneàDoubleAlimentation(MADA),» *Magister en Electrotechnique*, Biskra , 2013.
- [13] H. M. Boulouiha, «Contribution a l'étude et la commande d'une éolienne pour,» *Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de*, oran , 2013.

Chapitre II : Modélisation d'un system éolien

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

Introduction :

Après avoir transformé l'énergie éolienne en énergie électrique, il est nécessaire de l'adapter à la charge qu'elle alimente ou le réseau au quel est connecté notre système de production, car les éoliennes sont considérées comme des génératrices de puissance variable. Connectées sur un réseau électrique, les générateurs éoliens n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance -fréquence, autrement dit, elles ne participent pas aux services systèmes, et donc perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important [1].

Avec l'utilisation de la technologie de l'électronique de puissance, des nouvelles technologies sont apparues pour optimiser la production de cette énergie.

La tension fournie par le générateur fluctue en raison des fluctuations de sa vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent. Cela modifie la puissance électrique fournie à la charge livrée. De plus, la forme et la fréquence de la tension fournie ne correspondent pas nécessairement à la charge.

Pour remédier à ces problèmes on doit faire appel à l'électronique de puissances et ces convertisseurs statiques. Dans ce chapitre on va faire la commande et la modélisation de convertisseurs statiques associe à la conversion d'énergie éolienne.

1. Les convertisseurs statiques:

Un convertisseur statique est un système utilisé pour adapter l'énergie électrique de la source à un récepteur donné.

Par exemple :

- La transformation la tension alternative de réseau en tension continue avec les redresseurs.
- L'onduleur de secours convertit la tension continue de la batterie en tension alternative afin d'alimenter, par exemple, un équipement informatique.

1.1. Origine des convertisseurs de puissance électrique :

Les premiers convertisseurs de puissance ont été fabriqués par des machines électriques couplées mécaniquement. D'une part, les moteurs à courant alternatif (synchrones ou asynchrones)

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

sont couplés au réseau permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique à vitesse fixe. D'autre part, un moteur à courant continu dont l'excitation contrôlée permet d'obtenir une tension continue variable à la sortie. Le développement des composants de puissance au milieu du XXe siècle permet de développer des convertisseurs de puissance faites tourner la machine.

La technologie des composants (semi-conducteurs) utilisés est en constante évolution :

- à bas prix

-Haute puissance de commutation et facile à contrôler.

1.2. Famille des convertisseurs statiques

Selon le type de machine à commande et la nature de source d'énergie électrique, nous différencier plusieurs séries de convertisseurs statiques :

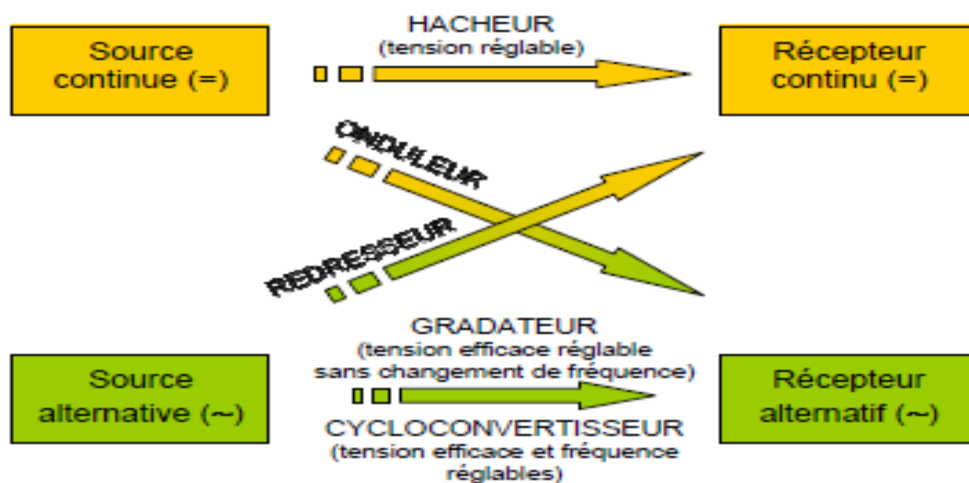


Figure III.1 : Famille des convertisseurs statiques [2].

Les convertisseurs de puissance sont largement utilisés dans les systèmes de production d'énergie éolienne. Pour les éoliennes à vitesse fixe, le convertisseur est utilisé pour réduire les oscillations de courant et de couple du démarrage, tandis que pour les éoliennes à vitesse variable, le convertisseur est utilisé pour contrôler la vitesse et le couple du générateur, ainsi que le contrôle actif et réactif de puissance injectée au réseau.

Généralement, trois types de convertisseurs de puissance sont largement utilisés sur le marché de l'énergie éolienne :

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

- Convertisseur conventionnel (back-to-back).
- Convertisseur multiniveaux.
- Convertisseur matriciel.

Dans la partie suivante, nous présenterons ces trois types de convertisseurs et leurs principaux avantages et inconvénients.

1.2.1. Convertisseur conventionnel (Back-to-Back)

Afin d'adapter la fréquence de la tension rotoriques à la fréquence du circuit statorique puis à la fréquence du réseau, la structure de puissance largement utilisée aujourd'hui est appelée Back to Back. Son utilisation est raisonnable car elle permet un fonctionnement en quatre quadrants, ce qui signifie que le sens du flux d'énergie peut être inversé à tout moment. Par conséquent, les deux convertisseurs de tension utilisés peuvent fonctionner en mode redresseur ou en mode onduleur, qu'ils soient connectés côté rotor ou côté réseau, de sorte que le bus continue est réversible.

Chacun des deux convertisseurs a trois bras de commutation et six commutateurs électroniques bidirectionnels, qui peuvent être contrôlés lors de l'ouverture et de la fermeture, et le type IGBT est connecté à la tête et à la bêche de la diode. La stratégie de contrôle du convertisseur est basée sur la technologie Pulse Width Modulation (PWM) ça veut dire MLI (modélisation de largeur impulsion en français), qui limite les harmoniques en réduisant le contenu des harmoniques basse fréquence.

La figure III.2 démontre la structure de conversion Back to Back (convertisseur a deux niveaux). Il se compose de deux convertisseurs « onduleur et redresseur » et d'un condensateur. Ces deux convertisseurs sont généralement des convertisseurs de tension équipés d'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) et de diodes pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue et assurer une conversion de puissance bidirectionnelle. Le condensateur situé entre les deux convertisseurs est souvent appelé «condensateur de liaison» ou «condensateur de découplage», ce qui permet de découpler la commande des deux convertisseurs. En général, le convertisseur côté générateur est commandé en fonction des exigences de magnétisation et de la vitesse requise, et le convertisseur côté ligne est commandé pour assurer une tension constante aux bornes du condensateur.

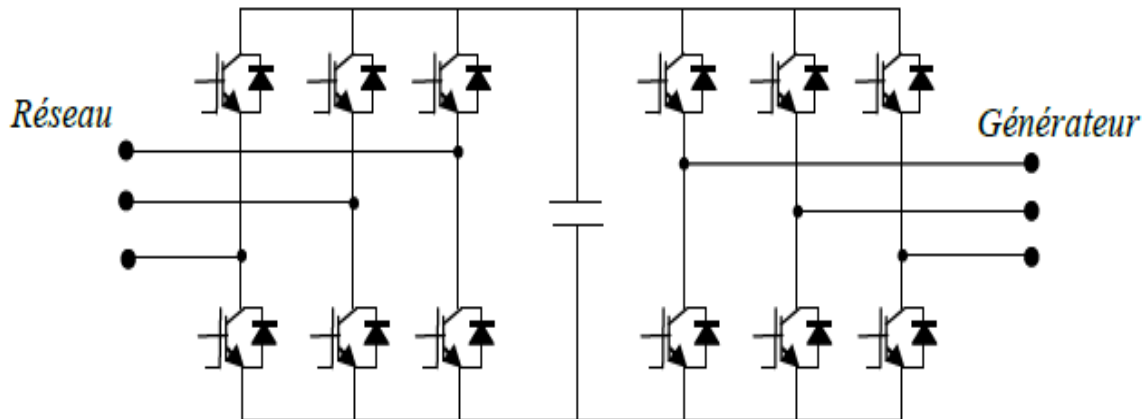


Figure III.2 : la structure de convertisseur Back to Back [3].

L'avantage d'utiliser ce type de convertisseur est que le condensateur de liaison permet une commande séparée entre le convertisseur côté générateur et le convertisseur côté ligne. De plus, le condensateur fournit également certaines mesures de protection contre les conditions anormales du réseau. Cependant, le condensateur de liaison est devenu un inconvénient majeur des convertisseurs conventionnels en raison de son encombrement et son poids, augmentant ainsi le coût et réduisant la durée de vie de l'ensemble du système. Il existe d'autres inconvénients, notamment les pertes de commutation et l'émission d'harmoniques haute fréquence, qui peuvent entraîner des coûts supplémentaires pour le filtre.

1.2.2. Convertisseur multiniveaux

Depuis le développement d'un convertisseur à pince de point neutre (Neutral Point Clamped) à trois niveaux (NPC), plusieurs structures alternatives pour les convertisseurs à plusieurs niveaux ont été rapportées dans la littérature. Comme le montre la figure, ces différentes structures peuvent être divisées en cinq catégories. L'idée générale d'utiliser un convertisseur multi-niveau est de générer une tension sinusoïdale à partir de plusieurs niveaux de tension généralement obtenus à partir de condensateurs[4].

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

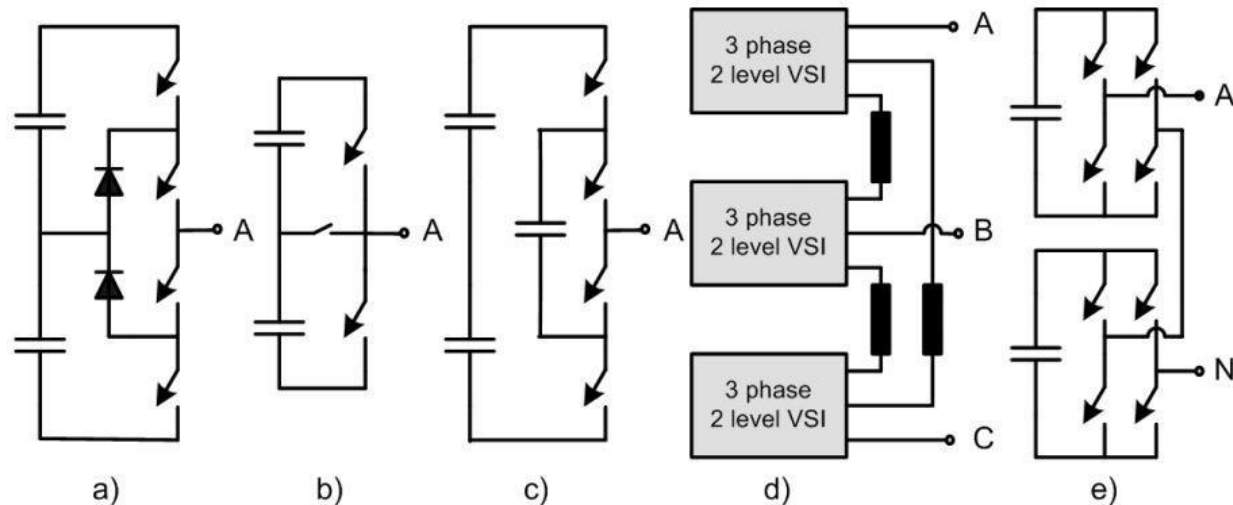


Figure III.3 : Structures d'un convertisseur multiniveaux [4].

- a) Un pied du convertisseur de pince à diode à trois niveaux.
- b) Un pied du convertisseur à trois niveaux avec interconnexion de commutateur bidirectionnel.
- c) Un pied du convertisseur à condensateur volant à trois niveaux.
- d) Un convertisseur à trois niveaux utilisant trois convertisseurs à deux niveaux.
- e) Une branche d'un convertisseur en cascade à pont en H à trois niveaux.

L'avantage d'un convertisseur multi-niveau est que la puissance est augmentée grâce à la tension, ce qui élimine le transformateur, offrant ainsi la possibilité de se connecter au réseau moyenne tension. Il existe d'autres avantages, tels que des pertes de commutation et des pertes de conduction réduites, qui rendent les convertisseurs à plusieurs niveaux plus efficaces que les convertisseurs à deux niveaux traditionnels. Evidemment, dans toutes les topologies représentées sur la figure 3, le nombre de semi-conducteurs et de condensateurs est supérieur à celui du convertisseur traditionnel à deux étages, ce qui rend le convertisseur multi-étage plus cher. Un autre inconvénient de ce convertisseur est le déséquilibre de tension provoqué par le condensateur de liaison.

1.2.3. Convertisseur matriciel

Le convertisseur matriciel est une sorte de convertisseur de puissance, qui est différent des convertisseurs traditionnels conventionnel ou multi-niveaux car il peut effectuer directement une

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

conversion de puissance sans condensateurs intermédiaires (Figure III.3). La conception typique d'un convertisseur matriciel triphasé comprend 9 commutateurs (interrupteurs). Il permet une conversion de puissance bidirectionnelle entre le réseau et le générateur, et grâce au contrôle de la matrice de commutation, l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie peuvent également être contrôlées. Dans le domaine de la production d'énergie, les convertisseurs matriciels sont devenus de plus en plus populaires parmi les chercheurs.

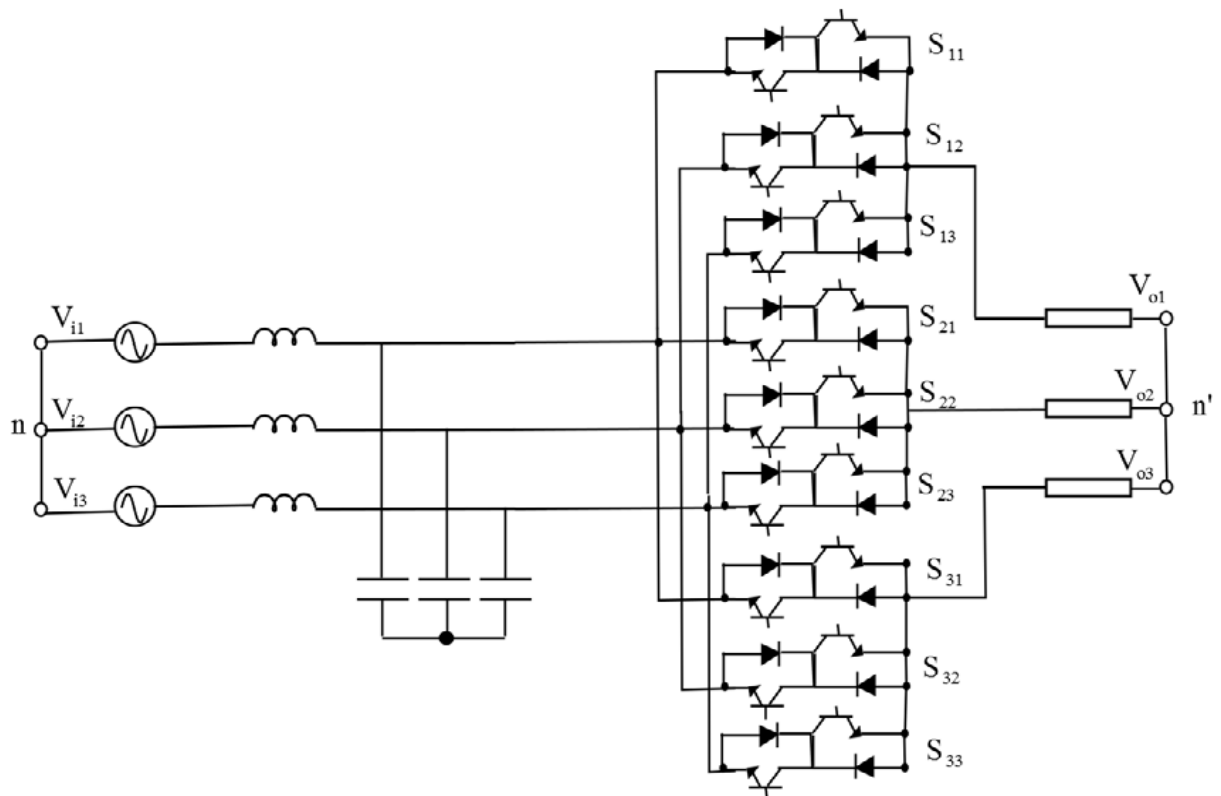


Figure III.3 : Structure d'un convertisseur matriciel triphasé [5].

Le manque de condensateurs de liaison conduit à un rendement élevé et augmente la durée de vie globale du système. De plus, la perte de commutation du convertisseur matriciel peut être inférieure à celle d'un convertisseur traditionnel à deux étages. D'autre part, ce type de convertisseur présente également certains inconvénients, tels que la limitation de la tension de sortie (86% de la tension d'entrée), la sensibilité aux interférences du réseau et les changements rapides de la tension d'entrée, ainsi que les coûts de commutation et interrupteurs plus élevés par rapport à celui-ci convertisseur conventionnel.

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

Dans notre travail on va choisir le convertisseur Back to Back et donc on va faire la modélisation et la commande de ce convertisseur coté machine (MADA) et coté réseaux.

La figure III.5 représente la structure Back to Back associée à la machine asynchrone double alimentation MADA.

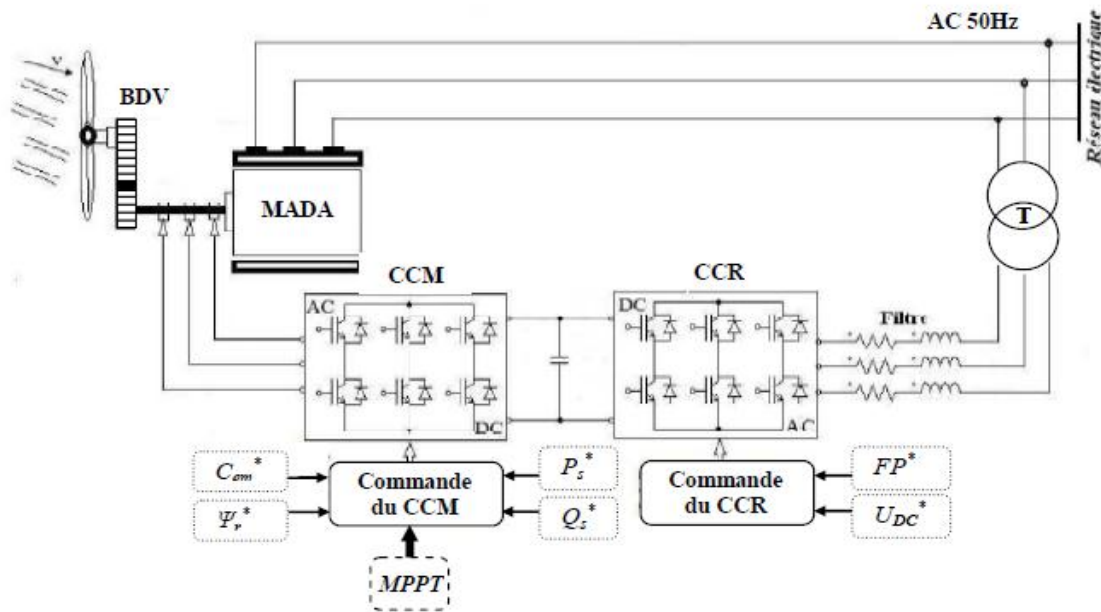


Figure III .4 : La structure AC-DC-AC (en anglais « back-to-back »)[6].

2. Modélisation des convertisseurs de puissance :

2.1. Structure du Convertisseur côté machine

La Figure III.6 montre la structure du côté convertisseur de la machine asynchrone. Lorsque vous utilisez des alimentations doubles, le stator est directement connecté au réseau et le rotor est connecté à un onduleur de tension, qui est alimenté par une source d'alimentation continue.

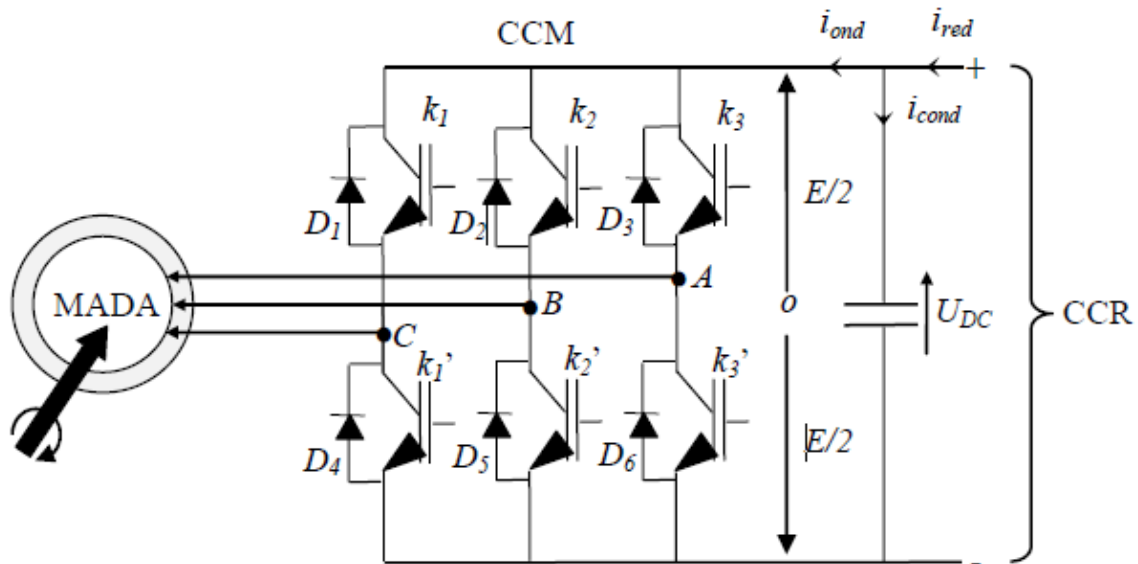


Figure III.5 : Structure de la MADA avec un convertisseur côté machine CCM.[6]

2.2. Modélisation des convertisseurs de tension :

Pour obtenir une tension alternative, la tension continue d'entrée doit être découpée et appliquée à la charge tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens. L'onduleur alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce à l'ouverture et à la fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux. La fréquence de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs.

Le système triphasé obtenu à la sortie du convertisseur est un système équilibré en tension ne contenant que des harmoniques impairs différents de trois, les harmoniques de rang trois et multiples de trois étant éliminés [7].

Le schéma de redresseur de tension triphasé est représenté sur la figure III.6:

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

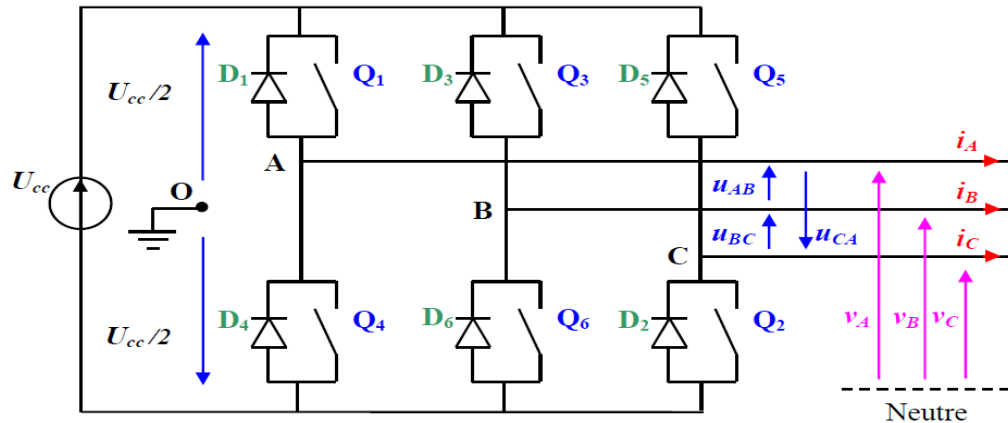


Figure III.6 : Schéma structurel d'un convertisseur de tension triphasé [7].

Les commandes des interrupteurs de chaque bras doivent être complémentaires pour éviter le phénomène de court-circuit de la source de tension continue.

Nous considérons un convertisseur idéal, donc les hypothèses suivantes sont faites :

- La commutation des composants est instantanée.
- La chute de tension de la borne est négligeable.
- Temps morts est négligé.
- La charge est triphasée équilibrée et couplée en étoile via des points neutres isolés.

Les relations des tensions composées sont :

$$\begin{cases} u_{AB} = v_{AO} - v_{BO} \\ u_{BC} = v_{BO} - v_{CO} \\ u_{CA} = v_{CO} - v_{AO} \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

Les relations des tensions simples coté charge sont :

$$\begin{cases} u_{AB} = v_A - v_B \\ u_{BC} = v_B - v_C \\ u_{CA} = v_C - v_A \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

Et en faisant les différences entre les membres, on obtient :

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

$$\begin{cases} u_{AB} - u_{CA} = 2 \cdot v_A - (v_B + v_C) \\ u_{BC} - u_{AB} = 2 \cdot v_B - (v_A + v_C) \\ u_{CA} - u_{BC} = 2 \cdot v_C - (v_A + v_B) \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

Par conséquent, les nouvelles expressions des tensions simples :

$$\begin{cases} v_A = \frac{1}{3} \cdot (u_{AB} - u_{CA}) \\ v_B = \frac{1}{3} \cdot (u_{BC} - u_{AB}) \\ v_C = \frac{1}{3} \cdot (u_{CA} - u_{BC}) \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

Tensions simples en fonction des tensions mesurées entre les points A, B, C et un point milieu fictifs O sont donc donnés par :

$$\begin{cases} v_A = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot v_{AO} - v_{BO} - v_{CO}) \\ v_B = \frac{1}{3} \cdot (-v_{AO} + 2 \cdot v_{BO} - v_{CO}) \\ v_C = \frac{1}{3} \cdot (-v_{AO} - v_{BO} + 2 \cdot v_{CO}) \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

La forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{AO} \\ v_{BO} \\ v_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux interrupteurs supposés parfaits et fonctionnant de façon complémentaire, on peut par conséquent associer à chacun d'eux une valeur binaire de commande S_i , avec ($i = A;B;C$) et telle que [7]:

- $S_i = +1$, si l'interrupteur du haut est fermé et l'interrupteur du bas ouvert ;
- $S_i = -1$, si l'interrupteur du haut est ouvert et l'interrupteur du bas fermé.

On peut maintenant écrire :

$$\begin{bmatrix} v_{AO} \\ v_{BO} \\ v_{CO} \end{bmatrix} = \frac{U_{cc}}{2} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{III-7})$$

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

La matrice suivante représente la modélisation de convertisseurs :

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \frac{U_{cc}}{2} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{III-8})$$

On obtient les tensions simples délivrées par l'onduleur directement à partir des états des grandeurs de commande SA, SB et SC qui sont les signaux de commande des interrupteurs. On détermine l'état de ces grandeurs par la stratégie de commande envisagée.

La configuration de puissance et le modèle mathématiques restant identiques pour le fonctionnement en onduleur ou redresseurs.

3. Commande CCM (coté machine) :

Techniques dites "MLI" ou de modulation de largeur d'impulsion «PWM» sont utilisés pour contrôler les convertisseurs statiques. Ces stratégies de contrôle sont basées sur une caractéristique de fréquence clé de découpage acceptable par les composants électroniques utilisés. Cette configuration permet d'imposer des courants à faibles distorsions harmoniques, ce qui facilitera l'opération de filtrage et réduira la taille des éléments filtrants associés et conduit finalement à la production d'une énergie de meilleure qualité.

Il existe plusieurs techniques de modulation de largeur d'impulsion sont utilisées dans le contrôle de ce type de convertisseurs afin de :

- 1) Pousser les harmoniques de la tension de sortie vers les hautes fréquences pour faciliter leur filtrage.
- 2) Modifier de la valeur de base de la tension de sortie.

Pour cela, nous pouvons citer les techniques suivantes[6][8].

La solution la plus largement utilisée consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire, d'où son appellation « *modulation sinus-triangle* ».

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

-On peut également utiliser une bascule à hystérésis commandée par la différence entre une onde de référence (ou son intégrale) et l'intégrale de la tension en créneaux à la sortie de l'onduleur ; c'est « *la modulation en delta* » ou en sigma delta.

- Dans certaines applications, on calcule au préalable, sur la base d'un critère d'optimisation les instants de commande. Les valeurs calculées sont introduites sous forme de table dans une mémoire morte ; la lecture de celle-ci par un système à microprocesseur assure la génération des signaux de commande des interrupteurs, c'est « *la modulation calculée* » dite aussi « *optimisée* ».

_ On peut aussi générer la séquence des signaux de commande des interrupteurs de façon à suivre au mieux le vecteur défini par les composantes de Clarke du système de tensions qu'on veut produire ; c'est la « *modulation vectorielle* ».

On a mentionné les techniques de commande les plus couramment utilisées pour contrôler les onduleurs de tension, plus loin, on va discuter de la modulation en triangle sinusoïdal plus en détail, dans le but de contrôler les onduleurs de tension et améliorer la qualité de l'énergie fournie à la sortie de l'onduleur.

3.1. Modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle « MLI-ST » :

Sa théorie est basée sur l'intersection d'une fréquence d'onde modulante a bas fréquence, dite tension de référence (généralement sinusoïdale), avec une onde porteuse à une fréquence de commutation élevée (généralement triangulaire ou en dents de scie. La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.[6]

La loi de modulation est :

$$v_i = \begin{cases} +U_{cc}/2 & \text{si } v_{mi} \geq v_p \\ -U_{cc}/2 & \text{si } v_{mi} < v_p \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

v_i : représente les tensions délivrées par l'onduleur.

v_{mi} : représente les tensions modulantes des phases i ($i = A, B, C$).

Les tensions obtenues à la sortie de l'onduleur sont formées par une succession de vagues rectangulaires dont la largeur varie selon une loi de commande qui vise à ramener les harmoniques

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

aux hautes fréquences et à la variation de la valeur effective de la tension fondamentale de sortie. La configuration est effectuée par les commutateurs d'ouverture et de fermeture et les séquences opérationnelles de fonctionnement.

La tension de référence est sinusoïdale, et il y a deux paramètres qui distinguent la commande :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{III-10})$$

- m : l'indice de modulation.
- f_p : fréquences de modulation.
- f_r : porteuse et la fréquence.

$$r = \frac{\hat{V}_m}{\hat{V}_p} \quad (\text{III-11})$$

Le coefficient de réglage R , égal à la relation entre l'amplitude de la tension de référence de modulation V_m et la valeur maximale (crête) du V_p de porteuse. La figure III.7 représente le principe de commande MLI Sinus-triangle triphasée.

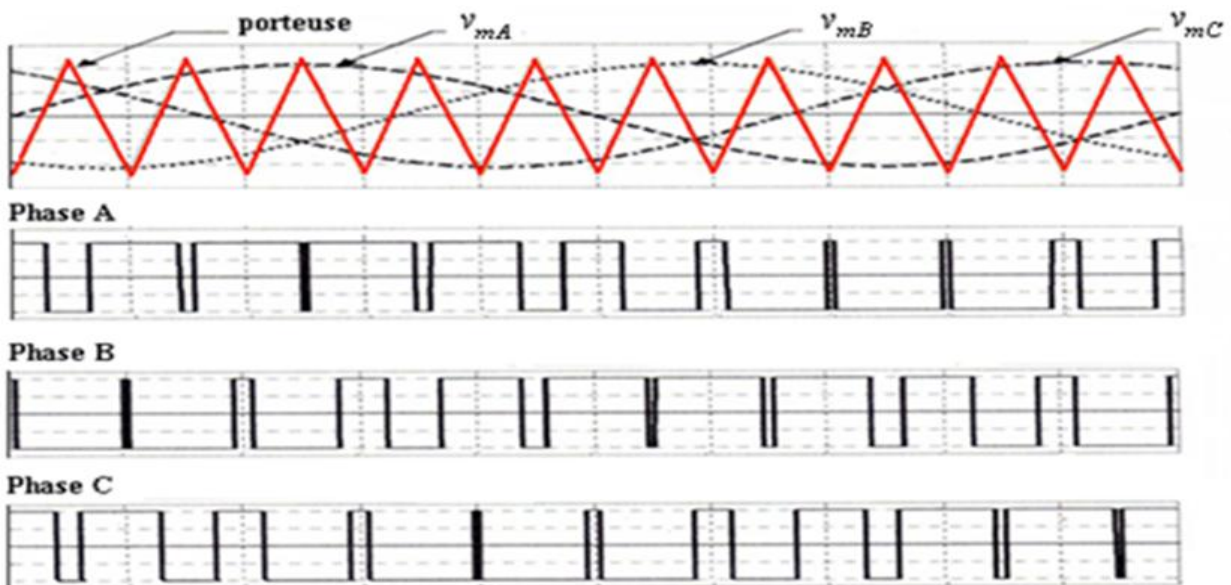


Figure III.7 : Principe de commande en MLI-ST[7].

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

L'indice de modulation est le résultat d'un compromis entre la bonne neutralisation des harmoniques et les bonnes performances de l'onduleur, ce dernier diminuant peut-être endommagé lorsque la fréquence de hachage augmente. Pour les grandes valeurs d'indice m, le primaire est pratiquement proportionnel aux valeurs unitaires de r, puis la commande PWM (MLI) permet le réglage de la tension de sortie permettant une régulation simultanée de la fréquence et de la tension de sortie.

On applique toujours un facteur de correction faible par rapport à l'unité pour éviter les erreurs de commutation qui peuvent conduire à une interruption de fonctionnement, par contre, le temps de commutation limite la valeur de m et minimise donc la largeur d'impulsion.

Pour modéliser la commande MLI Sinus-triangle, supposons que les trois ondes modulées sont sinusoïdales comme ceci :

$$\begin{cases} v_{mA} = \hat{V}_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \\ v_{mB} = \hat{V}_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - 2 \cdot \pi / 3) \\ v_{mC} = \hat{V}_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - 4 \cdot \pi / 3) \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

L'équation de transporteur commun a expression :

$$v_p = \begin{cases} \hat{V}_p \cdot \left(-1 + 4 \cdot \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ \hat{V}_p \cdot \left(+3 - 4 \cdot \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

La relation donnée les états des interrupteurs :

$$S_i = \begin{cases} +1 & \text{si } v_{mi} - v_p \geq 0 \\ -1 & \text{si } v_{mi} - v_p < 0 \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

T_p est la période du signal de l'onde porteuse.

La figure III.9 représente le schéma de contrôle de convertisseurs coté rotor sur lequel se situe la simulation Matlab de CCR.

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

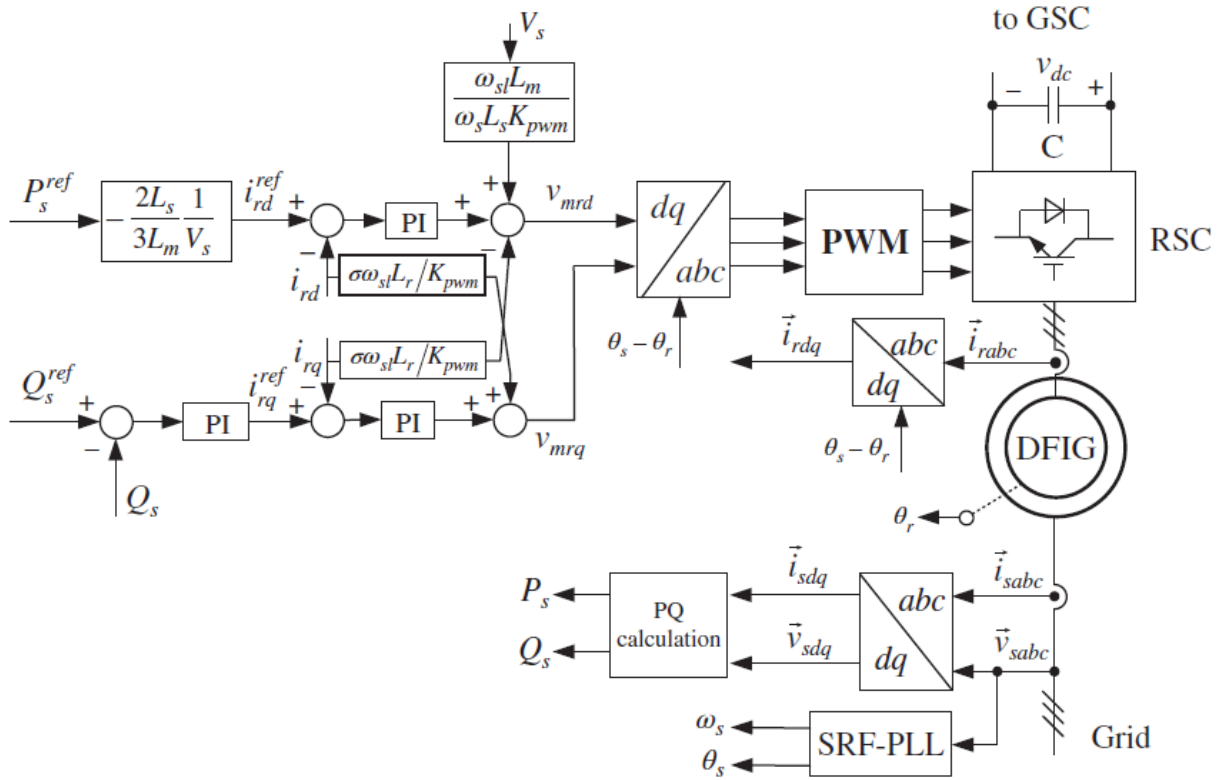


Figure III.8 :Schéma de contrôle de convertisseur coté machine [9].

La fonction principale de l'équipement de contrôle du convertisseur côté MADA est de réguler la transmission de la puissance active et réactive au réseau via le stator de la MADA. Il reçoit la puissance active et réactive de référence de l'unité (P_s _ ref, Q_s _ ref).

L'équation complexe ci-dessus peut être exprimée par les équations à composantes réelles de l'axe d et de l'axe q comme suit :

$$\begin{aligned} v_{rd} &= R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_{sl} \sigma L_r i_{rq} + \frac{\omega_{sl} L_m}{\omega_s L_s} v_{sd} \\ v_{rq} &= R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_{sl} \sigma L_r i_{rd} + \frac{\omega_{sl} L_m}{\omega_s L_s} v_{sq} \end{aligned} \quad (III-15)$$

Pour : $\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r$

On voit que les courants de rotor i_{rd} et i_{rq} sont contrôlés par les tensions de rotor v_{rd} et v_{rq} , respectivement. Les tensions rotoriques v_{rd} et v_{rq} sont les tensions de sortie du CCR. Les tensions du stator v_{sd} et v_{sq} sont considérées comme la perturbation du réseau dans le système. Le schéma

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

de commande du RSC est représenté par la figure III.9. La tension triphasée du stator \vec{v}_{sabc} , le courant triphasé du stator \vec{i}_{sabc} et le courant triphasé du rotor \vec{i}_{rabc} sont échantillonnés et transformés dans le référentiel dq. La puissance active et la puissance réactive sont contrôlées par les boucles de puissance extérieures. Pour la puissance active, une commande en boucle ouverte est utilisée, tandis qu'une commande en boucle fermée avec un régulateur PI pour la puissance réactive. Le courant de l'axe d du rotor i_{rd} est estimé à partir de la commande de puissance active, tandis que la référence de courant de l'axe q du rotor i_{rq} est générée par le régulateur PI de commande de puissance réactive externe. Il existe deux boucles de courant similaires, à savoir la boucle de contrôle du courant du rotor d'axe d et la boucle de contrôle du courant du rotor d'axe q. Les sorties du régulateur de courant du rotor de l'axe d et du régulateur de courant du rotor de l'axe q sont les références de tension du rotor v_{mrd} et v_{mrq} . Les références de tension du rotor sont utilisées pour générer des signaux PWM pour le convertisseur.

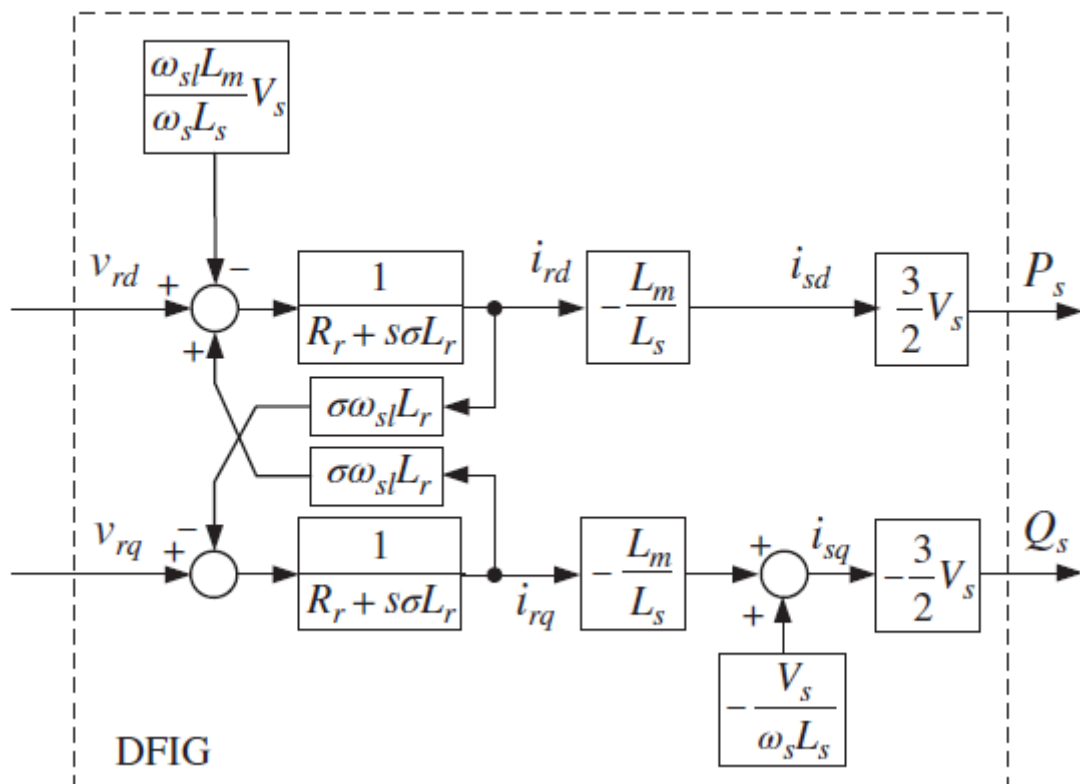


Figure III.9 : Schéma de principe pour le modèle de MADA en mode de contrôle de puissance [9].

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

4. Modélisation de la connexion du convertisseur côté réseau

Le convertisseur de puissance représenté sur la figure est connecté au réseau électrique via un filtre R-L. Le bus DC (continue) est connecté au condensateur C à la tension V_{DC} . Le but de ce convertisseur est de maintenir une tension constante entre les bornes du bus CC et d'ajuster le facteur de puissance au point où il est connecté au réseau.

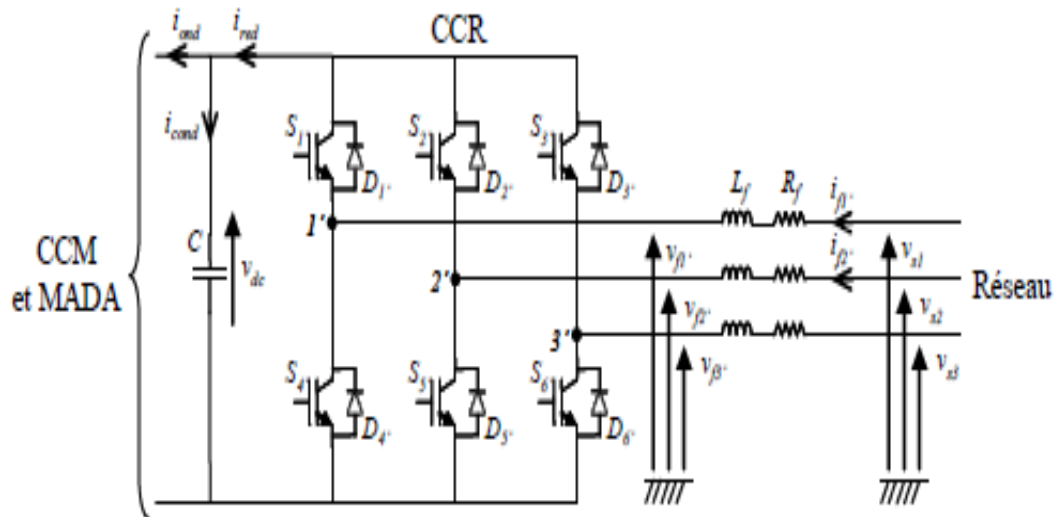


Figure III.10 : Connexion du CCR au réseau électrique [10].

Avec :

i_{ond} , i_{red} : respectivement les courants modulés par le CCM et le CCR,

i_{cond} : le courant traversant le condensateur,

V_{dc} : la tension du bus continu (tension aux bornes du condensateur),

S_i , D_i : respectivement les transistors IGBT et les diodes connectées en antiparallèle

($i=\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$),

R_f et L_f : respectivement la résistance et l'inductance du filtre RL,

v_{fk} : les tensions simples modulées par le CCR ($k = \{1, 2, 3\}$),

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

v_{sk} : les tensions simples du réseau électrique,

i_{f1} et i_{f2} : les courants circulant à travers le filtre RL.

4.1. Modélisation du bus continues :

Le bus continu doit être réglé à tension constante et le condensateur a comme rôle le stockage de l'énergie obtenue et la limitation des ondulations de la tension continue.

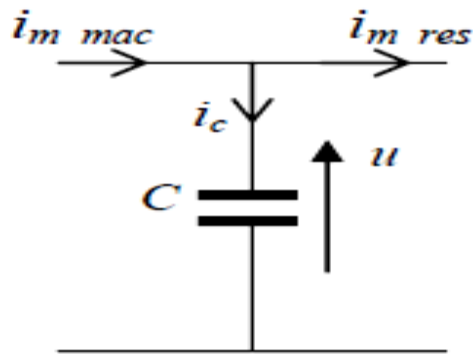


Figure III.11 : Schéma électrique du bus continu[11].

On obtient la tension de du bus continu à partir de l'équation :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_c \quad (\text{III-16})$$

Ou bien par cette équation :

$$v_{dc} = \int \frac{1}{C} \cdot i_c \cdot dt \quad (\text{III-17})$$

Le courant du condensateur provient du nœud où circulent les courants i_{mac} et i_{res} , modulé par les convertisseurs :

$$i_c = i_{mac} - i_{res} \quad (\text{III-18})$$

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

4.2. Modélisation du filtre passif :

Le courant transmis entre le convertisseur et le réseau est appliqué par une bobine qui forme un filtre passe-bas. La tension aux bornes du filtre est donnée par :

$$\begin{bmatrix} v_{m1} \\ v_{m2} \\ v_{m3} \end{bmatrix} = R_f \cdot \begin{bmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{III-19})$$

On applique la transformation de Park sur l'équation précédente on obtient :

$$\begin{cases} v_{md} = R_f \cdot i_{td} + L_f \cdot \frac{di_{td}}{dt} - \omega_s L_f \cdot i_{tq} + v_{sd} \\ v_{mq} = R_f \cdot i_{tq} + L_f \cdot \frac{di_{tq}}{dt} + \omega_s \cdot L_f \cdot i_{td} + v_{sq} \end{cases} \quad (\text{III-20})$$

Avec

- v_{md}, v_{mq} : les tensions modulées par le convertisseur dans le référentiel de Park.
- v_{sd}, v_{sq} : les tensions du réseau dans la référence de Park.
- i_{md}, i_{mq} : les composantes directes et quadratiques des courants du filtre.

5. Contrôle des puissances de convertisseurs côté réseau

L'alignement de la tension du réseau ne simplifie pas seulement l'équation de la tension de système mais aussi réduit le calcul de la puissance active et de la puissance réactive. En calculant les puissances actives et réactives on obtient :

$$\begin{cases} P_g = v_{dg} \cdot i_{dg} + v_{qg} \cdot i_{qg} \\ Q_g = v_{qg} \cdot i_{dg} - v_{dg} \cdot i_{qg} \end{cases} \quad (\text{III-24})$$

5.1. Orientation de tension statorique VOC

La commande du convertisseur côté réseau consiste à réguler la tension du bus continue et de contrôler la puissance active et réactive qui la traverse. Le facteur de puissance peut être mis à 1 en imposant simplement une puissance réactive nulle. Le contrôle vectoriel avec orientation du repère de Park en fonction du vecteur tension secteurs est au découplage entre le contrôle de puissance active et réactive.

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

Pour annuler l'élément de tension du stator quadratique il suffit d'orienter le repère dq. Autrement dit, on choisit le bon angle de rotation de Park tel que la tension statorique soit complètement concentrée sur l'élément direct (d), la figure représente le principe de cette méthode :

$$V_{dq} = V_d, V_{qg} = 0$$

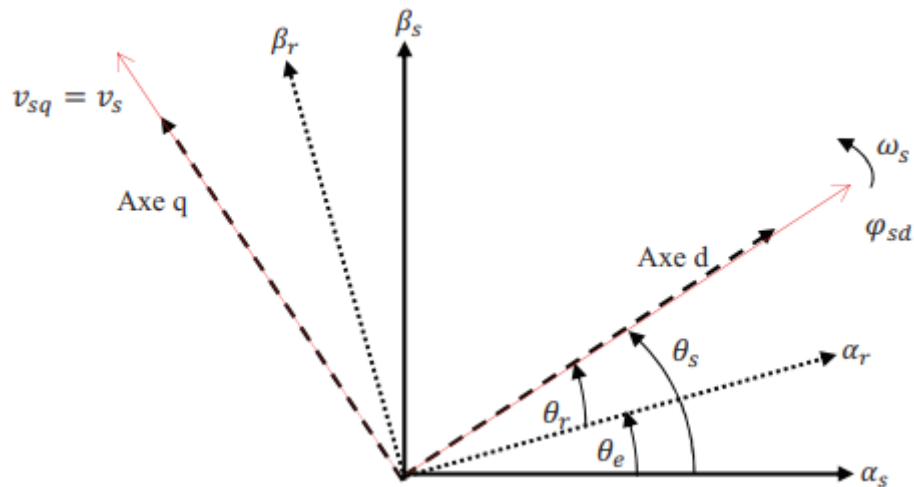


Figure III.12 : Orientation de tension statorique [12]

Depuis les équations (5-19) et (III-20) précédent on obtient :

$$\begin{cases} P_g = v_{dg} \cdot i_{dg} \\ Q_g = -v_{dg} \cdot i_{qg} \end{cases} \quad (\text{III-25})$$

Pour un onduleur parfait :

$$\begin{cases} v_{dc} \cdot i_{dc} = v_d \cdot i_{dg} \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_m \end{cases} \quad (\text{III-25})$$

Avec un régulateur PI. La sortie de ce régulateur PI du courant de l'axe q est prise comme tension de référence de l'axe q du convertisseur v_{mq} . Dans le schéma de commande illustré par figure 13 le découplage est introduit pour éliminer l'interférence entre les commandes de courant de l'axe d et de l'axe q. Une fois que nous obtenons les tensions de référence de l'axe d et de l'axe q du convertisseur v_{md} et v_{mq} , respectivement, les impulsions PWM(MLI) peuvent être générées

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

soit par MLI basé sur la porteuse, soit par MLI. Les tensions de référence de l'axe d et de l'axe q, respectivement v_{md} et v_{mq} , sont transformées en ondes de modulation triphasées, qui entrent dans le modulateur PWM pour générer des signaux de commutation pour le convertisseur.

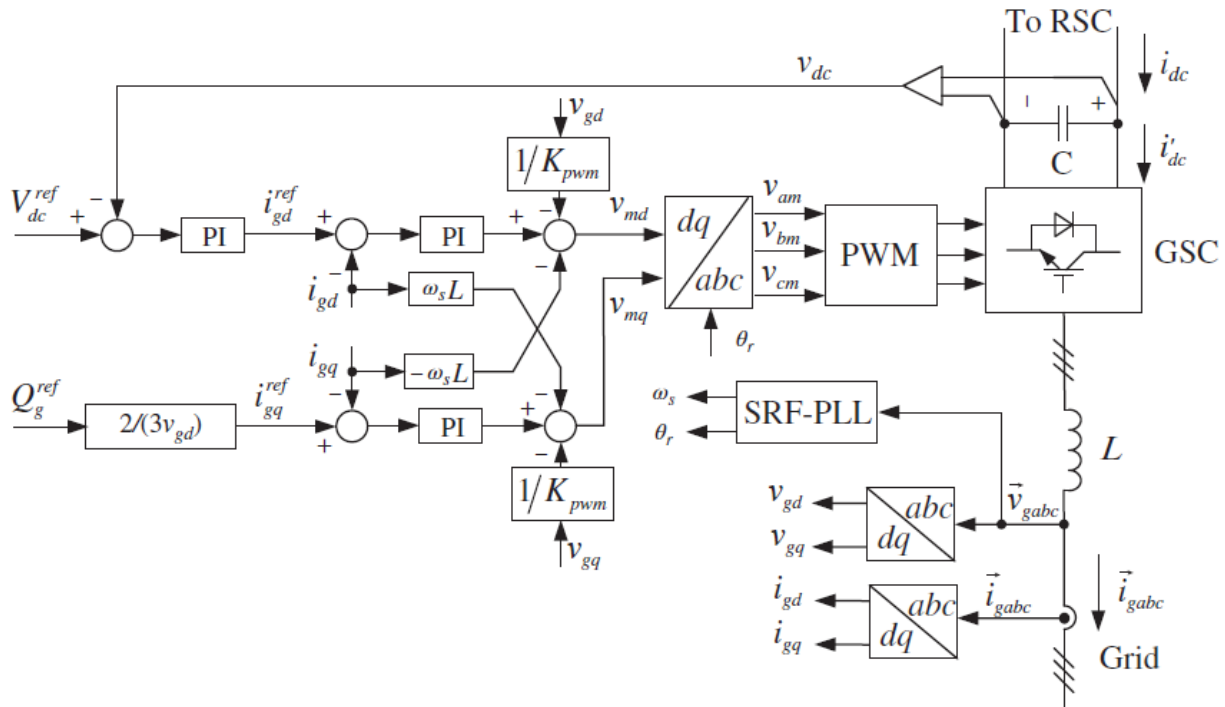


Figure III.13 :Schéma de contrôle de convertisseurs coté réseaux [9].

5.2. Contrôle de la tension du bus continu :

La stratégie de contrôle de la tension du bus continu est illustrée à la Figure III.10, où le courant de référence sur l'axe q est obtenu à partir de la boucle de tension externe du bus. L'expression de l'équation de nœud au niveau du bus DC est représentée par équation (III-23), où C représente la capacité de filtrage de la tension du bus DC ; i_{t1}, i_{t2}, i_{t3} sont les courants d'entrée du redresseur ; $S1, S2, S3$ sont des signaux de commande redresseur; I_{ond} est le courant mesuré à l'entrée de l'onduleur. La référence de courant sur l'axe d est mise à zéro pour obtenir le facteur de puissance uniforme. Le régulateur PI est utilisé pour contrôler la tension du bus DC.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a défini les convertisseurs statiques et ces types les plus utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne qui sont : le convertisseur conventionnel (back-to-

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

back), convertisseurs multiniveaux, convertisseur matriciel. Dans ce travail, nous avons choisi le convertisseur de type Back to Back et on a fait la modélisation de convertisseur côté machine et la contrôlé par la méthode MLI(sinus-triangle) et la modélisation de côté rotor avec le bus continu et le filtre passif. Nous avons ainsi traité le contrôle des puissances de l'onduleur et l'orientation de tension statorique avec le contrôle de la tension du bus continu par la méthode MLI vectorielle.

Bibliographie

- [1] . Woo, H. M., Kim, M. J., Lee, S. G., Nam, H. S., Kwak, H. H., Lee, J. S., ... & Hyun, C. (2007). Intraluminal tracheal stent fracture in a Yorkshire terrier. *The Canadian Veterinary Journal*, 48(10), 1063.
- [2] C. BISSIERES, «Formation-électronique-de-puissance-cours-19.pdf,» [En ligne]. Available: <https://www.electronique-mixte.fr/wp-content/uploads/2018/07/Formation-%C3%A9lectronique-de-puissance-cours-19.pdf>.
- [3] B. Abdelmalek, «TECHNIQUES DE COMMANDE AVANCEES,» DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTROTECHNIQUE, CONSTANTINE, 2018.
- [4] B. Abderraouf, «MODELISATION ET SIMULATION D'UNE,» *Pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3ème cycle*, CONSTANTINE, 2016.
- [5] A. Chemidi, «Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une,» *Diplôme De Doctorat*, Tlemcen, 2015.
- [6] Y. Djeriri, «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un,» *chez Doctorat en Sciences*, SIDI-BEL-ABBES, 2015.
- [7] LOUCIF. M, «Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le,» *l'obtention du grade de DOCTORAT 3ème Cycle*, Tlemcen , 2016.

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

- [8] G. Segulier, *Convertisseurs De l'Electronique De Puissance : La Conversion*, Paris, France, : Technique et Documentation Lavoisier, 2006.
- [9] Xu, D., Blaabjerg, F., Chen, W., & Zhu, N. (2018). *Advanced control of doubly fed induction generator for wind power systems*. John Wiley & Sons.
- [10] A. Gaillard, «Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie,» Université Henri Poincaré - Nancy , 2010.
- [11] M. Mesaoud, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent, thèse de magister de l'université de Batna,» 2008.
- [12] El Mehdi, ASAI (2016). *Commande d'un systeme d'énergies renouvelables Multisources relié au réseau électrique*». These de doctorat, *Convertisseurs électromécaniques*, université djillali liabes de sidi-bel-abbes.
- [13] Kendouli, F., Nabti, K., Labeled, K., & Benalla, H. (2011). Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation. *Journal of Renewable Energies*, 14(1), 109-120.
- [14] Christian BISSIERES, «electronique-mixte,» 07 2018. [En ligne]. Available: <https://www.electronique-mixte.fr>.

Chapitre3 : Modélisation et commande des convertisseurs statiques.

Chapitre4 : Interprétation des résultats de simulation.

1. Introduction :

Afin d'améliorer la qualité et le rendement d'énergie produit par la chaîne éolienne et diminuer le coût total on impose une stratégie de contrôle.

Et puisque notre thème c'est l'étude de convertisseurs d'ELN de puissance appliquée à l'énergie éolienne donc la stratégie de contrôle proposée est basée sur la commande vectorielle par l'orientation du flux statorique, cette méthode de contrôle permet d'obtenir des meilleures performances dans les applications à vitesse variable en fonctionnement générateur.

Dans un premier temps, nous allons présenter la stratégie de commande globale du système qui se compose de deux parties de commande :

- Le contrôle des convertisseurs côté MADA.
- Le contrôle des convertisseurs côté réseau.

Ensuite, le contrôle des convertisseurs côté MADA qui est basé sur la loi de commande vectorielle par orientation du flux qui permet d'effectuer un contrôle indépendant des puissances active et réactive sera traité à travers cette section de chapitre.

Dans un second temps, Le contrôle des convertisseurs côté réseau qui se compose d'un bus continu, d'un onduleur et d'un filtre sera également décrit et détaillé.

La deuxième partie de ce chapitre fera l'objet de présenter les résultats de la commande appliquée à l'ensemble de la chaîne de conversion.

2. L'explication de simulation :

Dans ce chapitre on va expliquer les résultats de simulation Matlab de chaîne éolienne associée à une machine asynchrone double alimentation mode génératrice (GADA) et au convertisseur back to back qui est divisé en convertisseurs côté réseau et côté machine. Les résultats de simulation sont divisés en deux parties :

- Simulation de chaîne éolienne à vitesse fixe.
- Simulation de chaîne éolienne à vitesse variable en utilisant un profil de vent variable.

2.1. Convertisseurs côté machine

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation

Les figures 9 et 10 de chapitre 3 représentent les schéma blocs de simulation de convertisseurs coté machine qui repose sur la technologie de commande vectorielle qui a l'objectif de d'arriver à commander la MADA de la même manière que d'une machine à courant continu à excitation indépendante. Cette méthode consiste au contrôle des puissance active P_s et réactive Q_s par les tension rotorique V_{rd} et V_{rq} de la MADA, la figure 1 montre le schéma de commande de convertisseurs coté machine dans programme de Matlab.

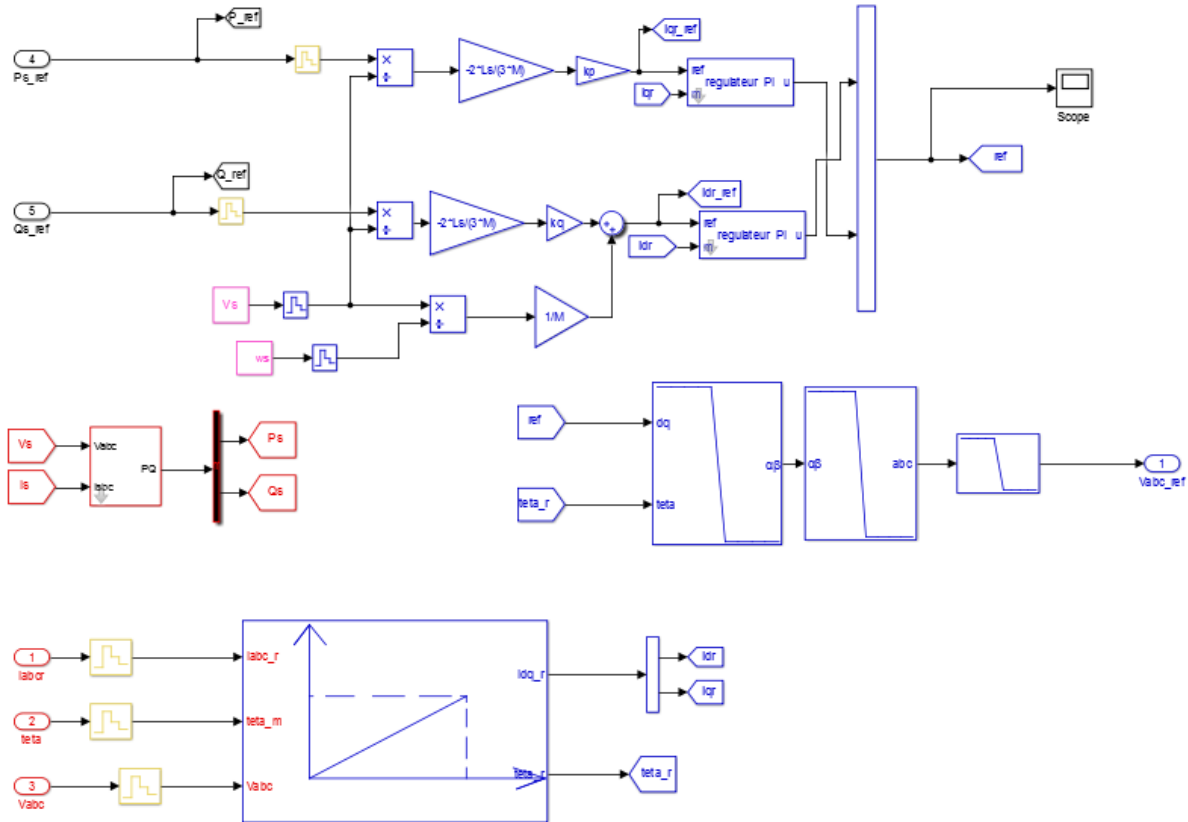


Figure IV.1 :Schéma de commande de CCM sur Matlab.

2.2. Convertisseur coté réseau

La figure 15 de chapitre 3 montre la commande de convertisseur cote réseaux. Le CCR est connecté au réseau via un filtre RL, le principal objectif du contrôle du convertisseur coté réseau se résume à réguler la tension du bus continu et à contrôler les puissances active et réactive transitant à travers ce dernier.

Le bus continue v_{as} lie la partie coté MADA au réseau en autorisant un transfert de de fréquences qui est différents pour les deux sources.

3.1. Simulation a vitesse fixe :

Pour évaluer la performance d'éolien a vitesse fixe, nous testons avec un ensemble de simulation sous l'environnement Matlab Simulink, la vitesse et le couple, la tension et les courant statoriques et rotoriques et la puissance active et réactive de ce modelé. Le premier test consiste à applique à l'instant initial un entrainement mécanique à vitesse fixe suite par un échelon négatif du puissance active du stator P_s^* à l'instant $t=1s$ avec une compensation de la puissance réactive du stator Q_s . La tension de bus continu est maintenu constant pendant l'essai grâce aux boucles de contrôle des courant du filtre I_{df} , I_{qf} .

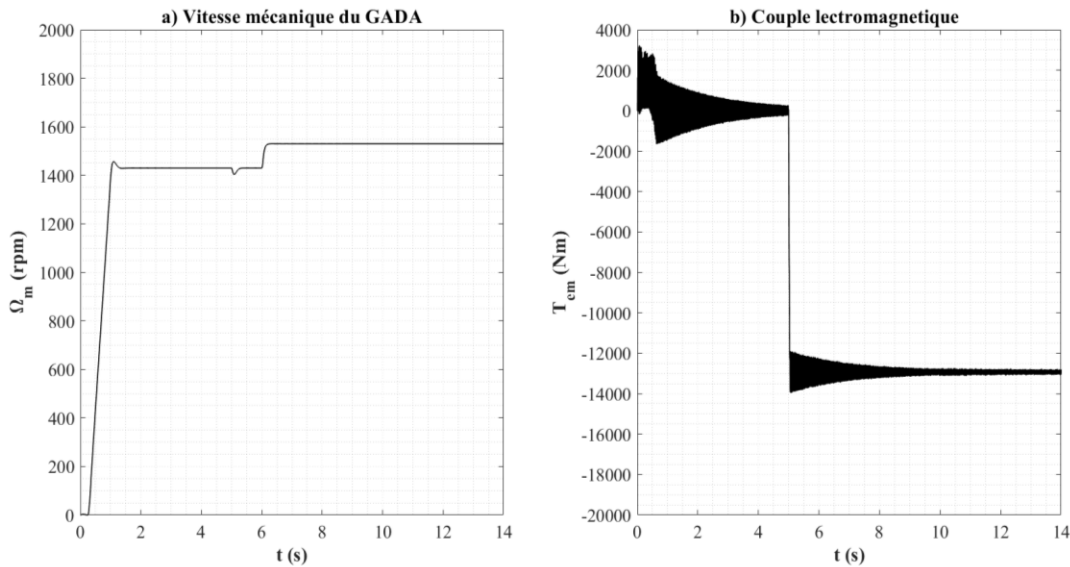


Figure IV.3 : Relation entre le couple et la vitesse de la machine.

Cette figure représente la relation entre la vitesse et le couple, et on note que le couple est directement proportionnel à la vitesse. L'échelon au puissance provoque un fort demande de couple, en conséquence, une légère augmentation au vitesse mécanique d'éolienne. Le couple électromagnétique a la même forme que la courbe de la vitesse de vent en raison de la proportionnalité entre eux.

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation

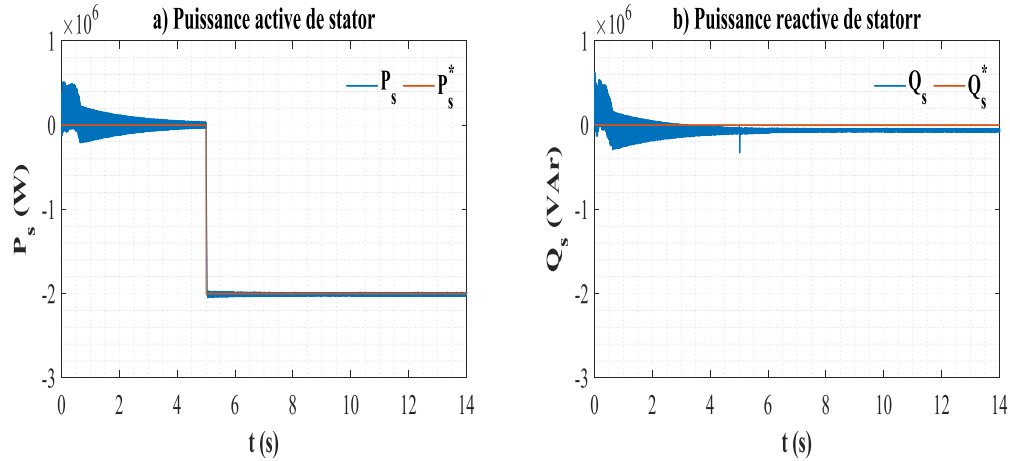


Figure IV. 4 : la puissance active P_s et réactive Q_s .

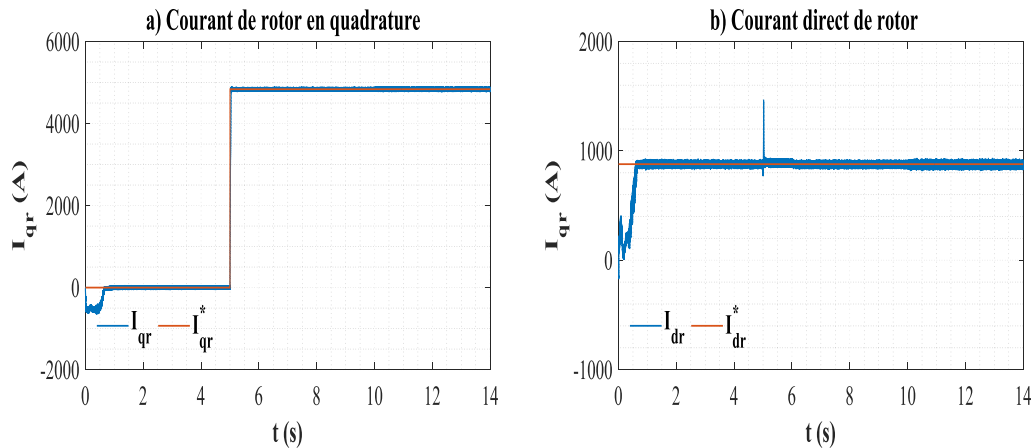


Figure IV.5 :Les courant idr et iqr

On remarque que la puissance active de la machine P_s est proportionnelle au courant de rotor en quadrature i_{qr} car on obtient la puissance via le produit de i_{qr} et la tension d'alimentation V_s . La puissance est négative parce la machine fonctionne comme génératrice (GADA) et lorsque le courant i_{qr} augmente P_s aussi augmenter. Dans le régime transitoire la puissance réactive est proportionnelle au courant i_{dr} en attendant le régime permanent au i_{dr} va prendre une valeur constant et Q_s devient 0 car on a posé une puissance réactive nulle pour faire le contrôle vectoriel. Les boucles de contrôle des courants rotoriques à base des régulateur PI classique montre de bonnes performances en terme de précision et suivie de consigne.

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation

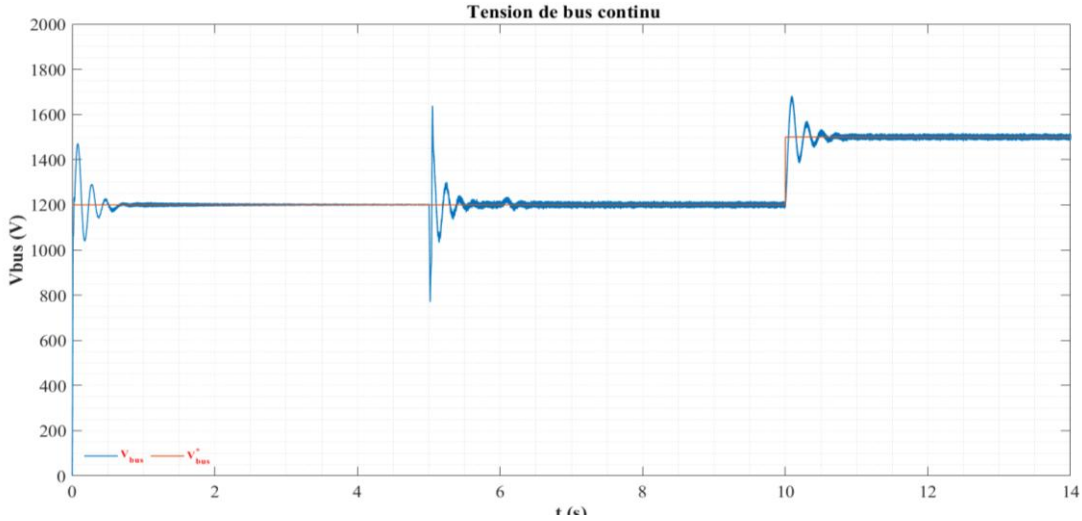


Figure IV.6 : Tension de bus continu

On remarque que le que le courant i_{df} et la tension de bus continu V_{bus} ont presque la même allure et ils sont presque identiques parce que le courant i_{df} est généré par la V_{bus} . au régime permanent le courant i_{df} prend une valeur proche de 0 mais pas nulle parce que il y'a pas de production d'énergie coté réseaux et V_{bus} prend une valeur constant égale à 1400V.

D'autre part, la tension du bus DC montre une dynamique rapide et précise. La tension V_{dc} atteint la valeur de référence de 1200V en 0,2 seconde sans dépasser, l'erreur statique est alors nulle après avoir atteint le régime établi.

A l'instant $t=10s$ en augmentant la consigne de bus continu afin d'évaluer la robustesse de contrôle de CCR. Le V_d mesuré suis leur référence correctement avec un temps de réponse rapide et un dépassement raisonnable au régime transitoire.

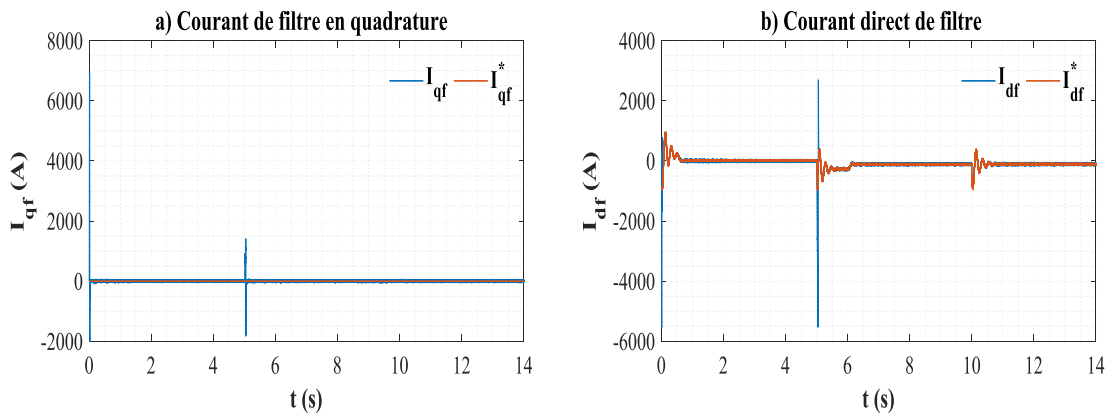


Figure IV.7 : Les courants filtre direct idf et en quadrature iqf

3.2. Simulation a vitesse variable :

Le deuxième essai consiste à tester le comportement d'éolienne sous un profil de vent réel afin de rapprocher au réalité par un entrainement aérodynamique réel. Le profil des vitesses du vent établis contient des valeur aléatoire autour de vitesse de synchronisme de la machine avec des transitions entre les deux modes de fonctionnement hypo-hypersynchrone.

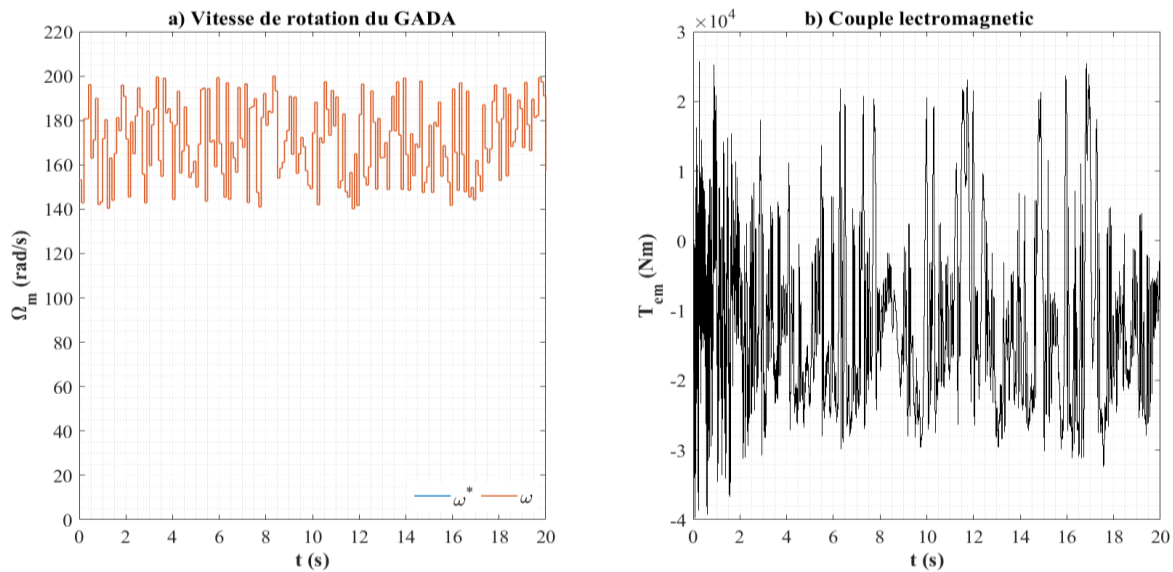


Figure IV.6 : Relation entre la vitesse et le couple électromagnétique.

La vitesse de la turbine oscille entre les modes de fonctionnement passant par la vitesse de synchronisme. En raison de la relation proportionnelle entre les deux, la courbe électromagnétique générée a presque la même forme que la courbe de vitesse du vent grâce à la présence de l'algorithme MPPT basé sur la boucle de la vitesse mécanique, on voit que le couple suit la vitesse de vent et il est négative parce on est au mode génératrice et la partie positive c'est des oscillations à cause de fréquence élevée du vent et de bus continue. En remarque aussi que la puissance active du stator suit sa référence générée par l'éolienne et a la même forme que le profil du vent appliqué. La fréquence élevée ans les variations des vitesses du vent affect aussi la qualité d'énergie produit ; qu's'effectue aussi par la mesure et les perturbations du réseau.

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation

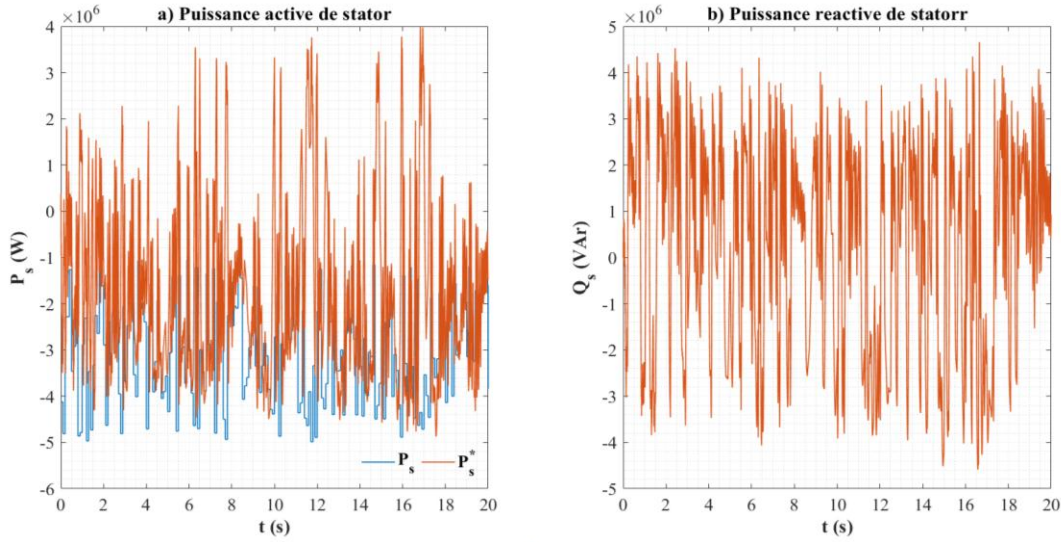


Figure IV.7 : L'allures des puissance active P_s et réactive Q_s

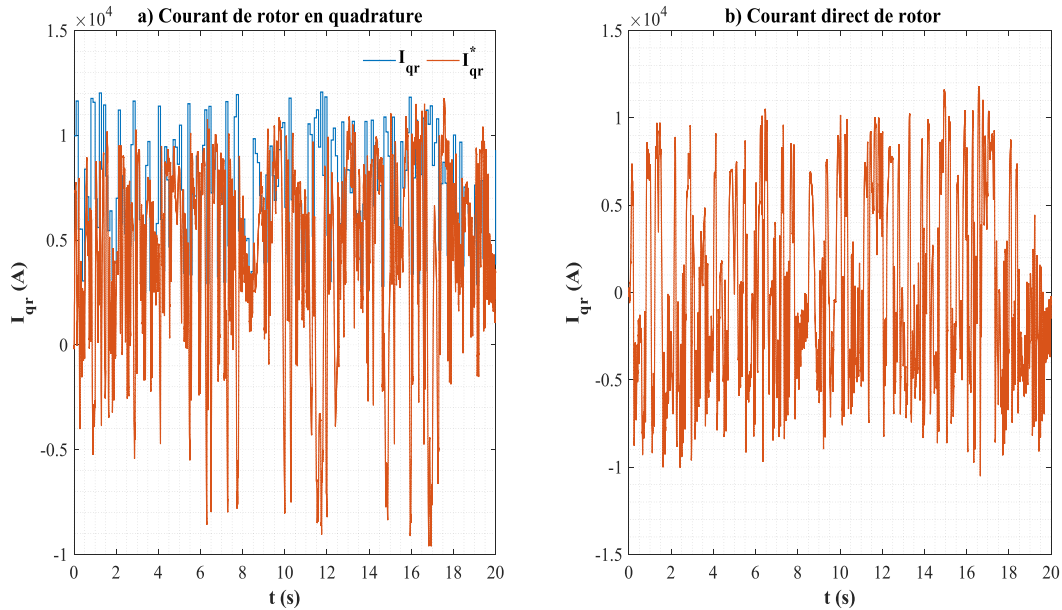


Figure IV.8 : Les courants direct et quadrature de rotor.

La puissance active P_s est proportionnelle au courant quadrature de rotor i_{qr} parce que on obtient P_s via le produit de i_{qr} et la tension statorique V_s , aussi on voit dans les deux paramètres qu'il y'a quelque déférence entre le signal de référence et le signal mesuré à cause des perturbations due au mesure et aussi des oscillations à cause de la fréquence élevée du vent et de bus continue.

On voit aussi pour ce cas que la puissance réactive Q_s n'est non pas compensée et l'énergie obtenue va être absorbé par la machine contrairement au cas précédent et elle va suivre le courant

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation

idr parce que on obtient Q_s via le produit de i_{dr} et V_s . Le seul inconvénient c'est les perturbations et l'oscillation qui effectuent un peu les résultats mais pas trop donc les résultats sont bons.

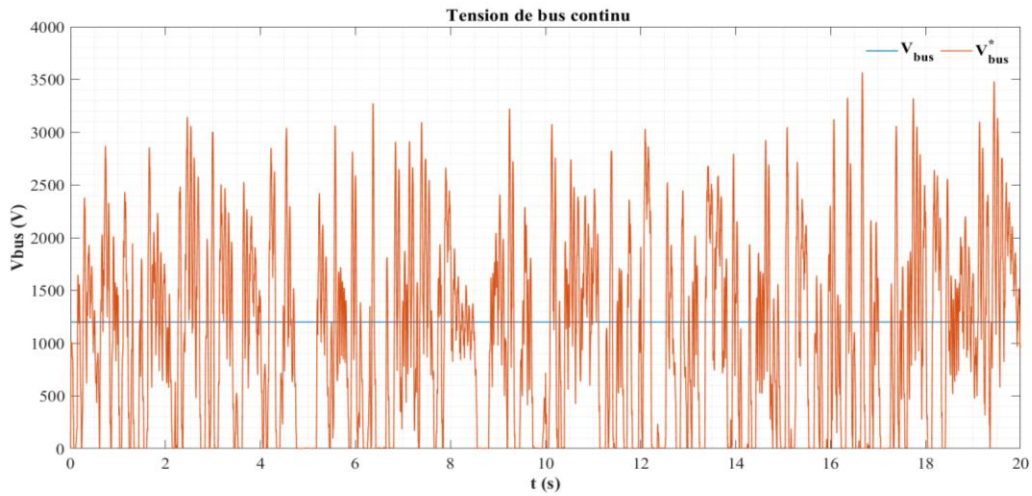


Figure IV.9 : L'allure de tension de bus continue V_{bus} .

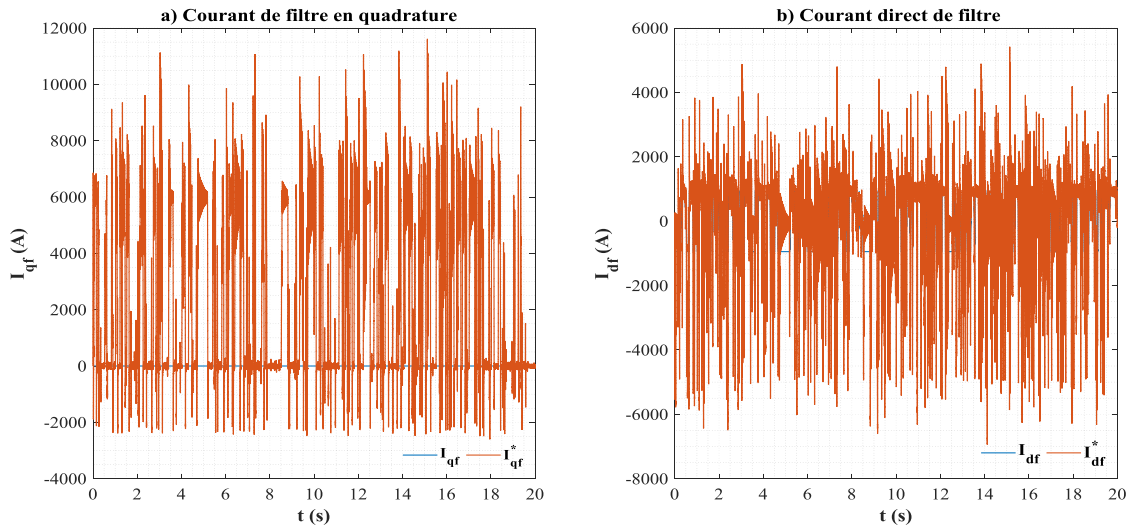


Figure IV.10 : L'allures des tensions coté réseaux direct et en quadrature.

On remarque que la tension de bus continue V_{bus} et le courant i_{df} ont presque la même allure parce que le courant i_{df} est génère par la tension V_{bus} , aussi on voit que V_{bus} est un peu perturbé par la fréquence élevée de la vitesse et aussi de lui-même, ce qu'influence aussi sur i_{df} et i_{qf} .

Le courant I_{qf} est l'image de la puissance réactive consommée/absorbée par le réseau. Cependant, ce courant est perturbé à cause des oscillations du vent, bruit de mesure, et les oscillations du réseau.

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation

4. Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait l'évaluation et l'interprétation des résultats de simulation d'éolien a vitesse fixe et à vitesse variable. Pour le premier cas les résultats montrent que la commande utilise pour la contrôle de puissance active et réactive coté rotor a base des courant rotoriques direct i_{dr} et le quadrature i_{qr} et la tension de bus continue et la réactive coté stator par les courant i_{df} et i_{qf} respectivement et aussi de vitesse donne des résultats précis et efficace. Pour le deuxième cas de vitesse variable les résultats sont un peu fluctuant par la fréquence élevée de vent et les oscillations du réseau, lors de ça les résultats sont bons et efficace avec une petite erreur statique et les paramètres suivent bien leurs références, donc les régulateurs PI classique montre des bonnes performances en terme de précision et le suivi de consigne par les paramètres mesurés donc la commande vectorielle est une bonne méthode de contrôle l'énergie éolien.

Conclusion générale

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation

L'objectif de travail présenter dans cette mémoire est l'étude des convertisseurs de l'électrique de puissance appliquer à l'énergie éolien, pour cela on a fait la simulation d'éolien associe au machine asynchrone double alimentation (MADA) sous l'environnement Matlab/Simulink/SimPowerSystem.

Pour le premier chapitre on fait Dans le premier chapitre, nous avons présenté l'histoire de l'énergie éolienne, le développement de cette énergie en Algérie et leur classement mondial. Puis nous nous sommes mis au travail principe de fonctionnement et constitution générale du système éolien. Suivant l'état actuel des connaissances sur les différents types de générateurs utilisés pour produire de l'électricité, un bref aperçu de la littérature technique sur la stratégie de contrôle est présenté. Enfin, par rapport à cet état des connaissances, les enjeux de cette thèse et les objectifs fixés sont présentés.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit trois parties principales conversion d'éolienne, la première est la modélisation de partie mécanique contenant la turbine et l'arbre du générateur. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons examiné la modélisation de la machine asynchrone double alimentation fonctionner en mode génératrice. Sur la base de quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été développé. Nous avons trouvé que le modèle de la machine asynchrone double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park a permis de simplifier ce modèle.

Le chapitre3 :il est divisé en 2 partie, la première partie consiste à faire la modulation des convertisseurs coté rotor et coté réseaux et le bus continue avec les équations mathématiques et on a défini les types de convertisseurs utilise dans conversion d'énergie éolien et on a choisi le convertisseur Back to Back associe à la génératrice asynchrone double alimentation GADA qui consiste de deux convertisseurs à IGBT (CCM et CCR) connectés entre eux par un bus continu. Dans la deuxième partie on a discuté le type de contrôle utilise qui est le contrôle vectoriel des puissances à travers les convertisseurs coté rotor et réseau.

Le chapitre 4 : dans ce chapitre on a présenté les résultats des simulations d'éolien a vitesse fixe et à vitesse variable et on a fait l'interprétation des résultats de simulation, Les résultats sont satisfaisantes et précis spécialement pour le cas où la vitesse est fixe, pour le cas de vitesse variable

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation

on remarque des oscillations à cause de fréquence élevée de vent et de bus continue à part ça les résultats sont bonne.

Annexe A

A-1-Paramètre de la turbine éolienne

Nom	Valeurs	Unité
Fréquence du réseau	50	Hz
Puissance nominale du stator	2.10^6	W
Vitesse de synchronisme	1500	tr/min
Puissance active statorique	2.10^{-6}	W
Coefficient de friction	135	/
Courant nominal statorique	1760	A
Tension du réseau	690	V
Nombre de pair de pole	2	
Couple électromagnétique	13000	N/m
Tension nominale du rotor	2070	V
Résistance rotorique	$2,9.10^{-3}$	Ohm
Résistance statorique	$2,6.10^{-3}$	Ohm
Inductance mutuel	$2,5.10^{-3}$	Henry

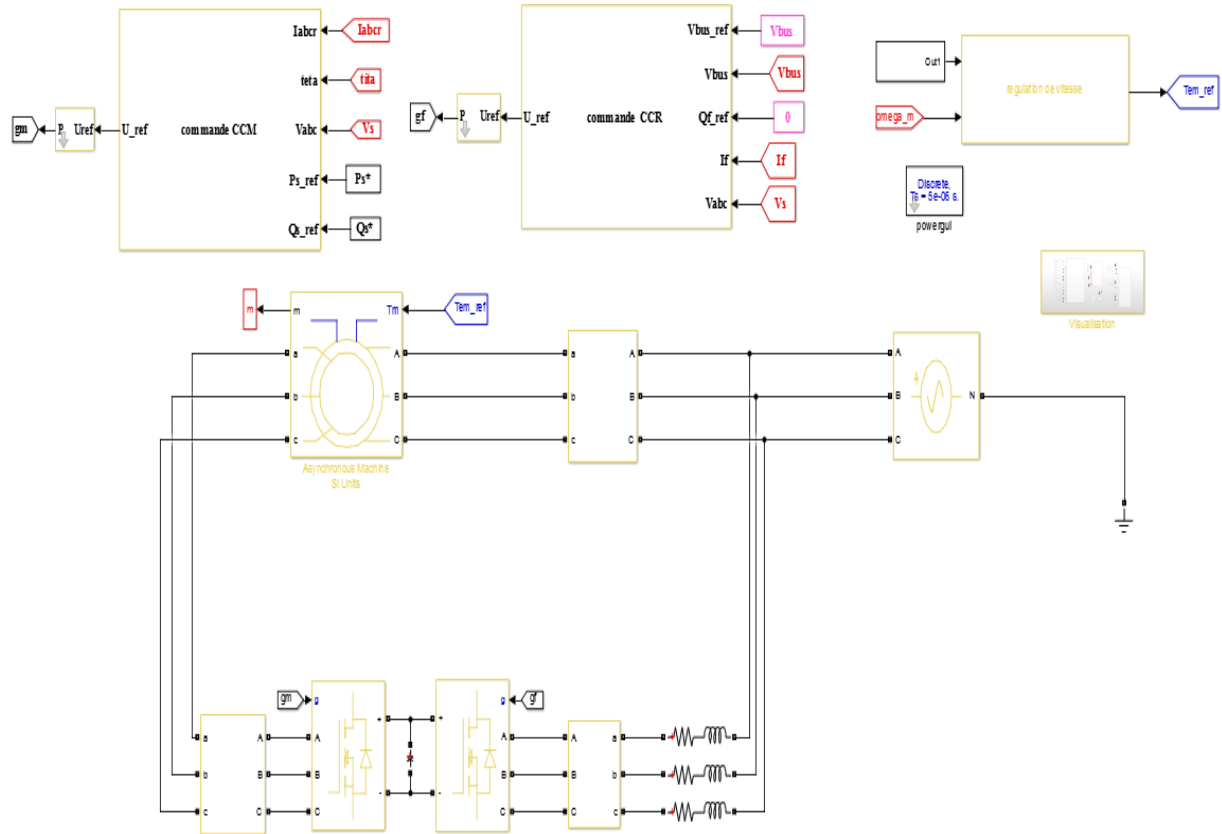
A-2-Paramètres de la liaison au réseau

Nom	Valeur	Unité
Pulsation du réseau	$2\pi. 50$	Rd
Tension bus continu	1200	V
Capacité du bus continu	$2,5.10^{-3}$	F
Résistance de filtre	$2,5.10^{-5}$	Ohm
Inductance de filtre	300.10^{-6}	Henry

Annexe B

B-1-modele Simulink de la chaine éolienne :

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation



B-2-Conditions de simulations :

Type : Fixed-step	
Ode4 (RungeKuttaordre4)	
Tasking mode for periodic sample time	0.0001
Tasking mode for periodic sample time	auto

Résumé

L'objet de ce projet est de l'étude des convertisseurs de l'électronique de puissances appliquées à l'énergie éolien. Nous avons présenté l'états de l'art des éoliennes, puis nous avons étudié la partie mécanique intégrant la turbine, le multiplicateur, et ces deux types de control MPPT afin de définir la meilleure stratégie control de l'aérogénérateur, ensuite on s'intéressé à la partie électrique (la génératrice) associée à deux convertisseur cotée machine et cotée réseau. Enfin nous avons présenté la stratégie de commande du modèle complet du système éolien qui est basé sur une commande vectorielle par orientation du flux, les résultats des simulations montre que l'objectif assigné a bien été atteint.

Mots-clés : l'énergie éolien, électronique de puissance, convertisseurs statiques MPPT, Machine asynchrone à double alimentation, commande vectorielle.

Abstract:

The object of this project is the study of power electronics converters applied to wind energy. We presented the state of the art of wind turbines, then we studied the mechanical part integrating the turbine, the multiplier, and these two types of MPPT control in order to define the best control strategy for the wind generator, then we interested in the electrical part (the generator) associated with two converter machine side and network side. Finally we presented the control strategy of the complete model of the wind system which is based on a vector control by direction of the flow, the results of the simulations show that the assigned objective has been reached.

Keywords: wind energy, power electronics, static MPPT converters, dual power asynchronous machine, vector control.

:الملخص

الهدف من هذا المشروع هو دراسة محولات إلكترونيات الطاقة المطبقة على طاقة الرياح. قدمنا حالة فن توربينات الرياح ، ثم من أجل تحديد أفضل استراتيجية MPPT درسنا الجزء الميكانيكي الذي يدمج التوربين والمضاعف وهذين النوعين من التحكم تحكم لمولد الرياح ، ثم اهتمنا بالكهرباء الجزء (المولد) المرتبط بجانبين من آلة المحول وجانب الشبكة. أخيرًا قدمنا استراتيجية التحكم للنموذج الكامل لنظام الرياح الذي يعتمد على التحكم في المتجهات حسب اتجاه التدفق ، تظهر نتائج المحاكاة أنه تم الوصول إلى الهدف المحدد.

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح ، إلكترونيات الطاقة ، محولات الثابتة ، آلة غير متزامنة ثنائية الطاقة ، التحكم في القوة الموجهة.