

Université Abderrahmane Mira de Béjaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



Mémoire de fin de Cycle

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

Spécialité : Energie Renouvelable et Commande Electrique

Theme

Etude d'une éolienne en fonctionnement autonome basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné

Réalisé par :

- BOUSSEKINE Salima**
- KACI Soraya**

Encadreurs :

- Mme CHEKKAL Samira**
- Mr AOUZELLAG Djamel**

Promotion 2024

Remerciements

Nous tenons à remercier :

Notre Dieu de nous avoir donné le courage et la patience dans la réalisation de notre travail jusqu'à sa fin.

Nous sincères remerciements pour nos deux promoteurs **Mme CHEKKAL Samira** et **Mr AOUZELLAG Djamel** pour toutes leurs orientations, leurs conseils judicieux et le temps qu'ils nous avons accordé pour notre encadrement. Nous exprimons les mêmes sentiments de gratitude à tous nos enseignants du primaire à l'université.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, je ne trouverai jamais l'expression forte pour vous exprimer tout mon amour, ma reconnaissance et ma profonde gratitude pour vos sacrifices.

Je pris Allah, le tout puissant, pour qu'il vous accorde longue vie et qu'il me pardonne la peine que je vous ai infligé durant ces années d'étude.

A mon chère frère ferhat qui a été toujours à mes cotés

A ma grand-mère Timouche ;

A la mémoire de mes grands-parents ;

A mes cousins et cousines Aris, Juba, Foufa, Sissi, Naima, Narimen, sylvia Kiki, Bahsou ;

A toutes mes tantes ;

A mon oncle Rachid ;

A tous mes amis ;

A ma binôme Soraya

Salima

DÉDICACES

A MES TRÈS CHERS PARENTS ;

A MES CHERS FRÈRES ;

A MES SŒURS ;

A TOUS MES AMIS MES COLLÈGUES ;

A MA BINÔME SALIMA ;

SORAYÁ

Liste des symboles abréviations

Liste des symboles abrégés

a_s, b_s, c_s	Axes magnétiques des enroulements statoriques
a_r, b_r, c_r	Axes magnétiques des enroulements rotoriques
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Composantes de la tension statorique dans le repère (abc) [V]
v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}	Composantes de la tension rotorique dans le repère (abc) [V]
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Composantes du courant statorique dans le repère (abc) [A]
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	Composantes du courant rotorique dans le repère (abc) [A]
$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$	Composantes du flux statorique dans le repère (abc) [Wb]
$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$	Composantes du flux rotorique dans le repère (abc) [Wb]
Ω	Vitesse mécanique de la génératrice [rd/s]
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine [rd/s]
C_r	Couple mécanique de la génératrice [N.m]
C_{vis}	Couple des frottements visqueux [N.m]
C_g	Couple de la génératrice [N.m]
C_{em}	Couple électromagnétique de la génératrice [N.m]
C_t	Couple aérodynamique de la turbine [N.m]
P_t	Puissance aérodynamique de la turbine [W]
P_v	Puissance du vent [W]
J_{tr}	Inertie de la turbine [kg.m ²]
J	Inertie totale sur la chaîne de conversion mécanique [kg.m ²]
J_g	Inertie de la génératrice [kg.m ²]
G	Rapport de vitesse du multiplicateur
R	Rayon de la turbine [m]
S	Surface circulaire balayée par la turbine [m ²]
ρ	Densité de l'air [kg/m ³]
V	Vitesse du vent [m/s]
C_p	Coefficient de puissance de la turbine éolienne
β	Angle d'inclinaison des pales [°]
λ	Vitesse spécifique de la turbine
f	Coefficient de frottements visqueux [N.m.s/rd]
s	Opérateur de Laplace

Liste des symboles abrégés

R_s, R_r	Résistances des enroulements du stator et du rotor respectivement [Ω]
L_s, L_r	Inductances cycliques du stator et du rotor respectivement [H]
L_m	Inductance mutuelle cyclique [H]
d, q	Système d'axes du repère tournant
θ	Position de l'axe statorique par rapport à l'axe rotorique [rd]
θ_s	Position angulaire du stator [rd]
θ_r	Position angulaire du rotor [rd]
ω	Vitesse électrique de la MADA [rd/s]
ω_s	Pulsation des tensions statoriques [rd/s]
ω_r	Pulsation des tensions rotoriques [rd/s]
P	Nombre de paires de pôles de la génératrice
v_{sd}, v_{sq}	Composantes de la tension statorique dans le repère (d, q) [V]
v_{rd}, v_{rq}	Composantes de la tension rotorique dans le repère (d, q) [V]
i_{sd}, i_{sq}	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q) [A]
i_{rd}, i_{rq}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q) [A]
ϕ_{sd}, ϕ_{sq}	Composantes du flux statorique dans le repère (d, q) [Wb]
ϕ_{rd}, ϕ_{rq}	Composantes du flux rotorique dans le repère (d, q) [Wb]
P_s, Q_s	Puissances active et réactive statoriques [W] [VAr]
P_r, Q_r	Puissances active et réactive rotoriques [W] [VAr]
S_{rjj}, S_{sj}, S_{gi}	Fonctions de connexion logique des convertisseurs
$v_{on_a}, v_{on_b}, v_{on_c}$	Tensions de sortie de l'onduleur [V]
v_{dc}	Tension du bus continu [V]
C_{dc}	Capacité du condensateur du bus continu [F]
I_m, T_m	Indice de modulation et taux de modulation, respectivement
$f_p, f_{réf}$	Fréquence de la porteuse et de référence, respectivement [Hz]
$v_p, v_{réf}$	Tension de la porteuse et de référence, respectivement [V]
i_{sc}	Courant issu du convertisseur coté stator [A]
i_{rc}	Courant issu du convertisseur coté rotor [A]
i_m	Somme des deux courants issus des convertisseurs coté machine [A]
i_{lc}	Courant continu modulé par le convertisseur coté charge [A]

Liste des symboles abrégés

i_c	Courant capacitif traversant le condensateur du bus continu [A]
g	Glissement de la génératrice

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétiques

Figure I.1 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne

Figure I.2 : Composants principaux d'une éolienne

Figure I.3 : Capacité mondiale installée en GW

Figure I.4 : Eoliennes à axe vertical

Figure I.5 : Eoliennes à axe horizontal

Figure I.6 : Éolienne à vitesse constante avec génératrice asynchrone

Figure I.7 : Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone

Figure I.8 : Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone

Figure I.9 : Eolienne à vitesse variable utilisant une MAS à rotor bobiné

Figure I.10 : Modes de fonctionnements caractéristiques de la MASRB

Figure I.11 : Pompage au fil du soleil de petite puissance

Figure I.12 : Pompage au fil du soleil de forte puissance

Figure I.13 : Petit site isolé

Figure I.14 : Exemple de groupes électrogènes semi-industriels

Figure I.15 : Eolienne à aimants permanents débitant directement sur des batteries et une charge

Figure I.16 : Générateur connecté à un convertisseur unidirectionnel

Figure I.17 : Schéma d'une installation autonome basé sur la MASRB

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une MASRB

Figure II.1 : Système éolien étudié basé sur une MASRB

Figure II.2 : Configuration d'une turbine éolienne

Figure II.3 : Turbine éolienne reliée à un générateur par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse.

Figure II.4 : Structures d'un multiplicateur

Figure II.5 : Schéma bloc du modèle de la turbine

Figure II.6 : Règle de la main droite

Figure II.7 : Représentation schématique de deux enroulements statorique et rotorique de la MASRB

Figure II.8 : Repère de référence : statorique $s\alpha$ - $s\beta$; rotorique $r\alpha$ - $r\beta$; tournant dq

Figure II.9 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé

Figure II.10 : Principe de la commande MLI sinus-triangle

Chapitre III : Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié

Figure III.1 : Système global d'une MASRB en fonctionnement autonome

Figure III.2 (a): Allures de la tension et du courant statoriques (alimentation directe)

Figure III.2 (b): Allures de la tension et du courant statoriques (avec convertisseur)

Figure III.3 (a): Zoom sur la tension et le courant statoriques (alimentation directe) ;

Figure III.3 (b) : Zoom sur la tension et le courant statoriques (avec convertisseur)

Figure III.4 (a): Allures de la tension et du courant rotoriques (alimentation directe) ;

Figure III.4 (b) : Allures de la tension et du courant rotoriques (avec convertisseur)

Figure III.5 (a): Zoom sur l'Allure de la tension et du courant rotoriques (alimentation directe)

Figure III.5 (b) : Zoom sur Allure de la tension et du courant rotoriques (avec convertisseur)

Figure III.6 (a): Allure de la puissance active rotorique (alimentation directe) ;

Figure III.6 (b) : Allure de la puissance active rotorique (avec convertisseur)

Figure III.7 (a): Allure de la puissance réactive rotorique (alimentation directe) ;

Figure III.7 (b) : Allure de la puissance réactive rotorique (avec convertisseur)

Figure III.8 (a): Allures de la tension et du courant statoriques (alimentation directe)

Figure III.8 (b) : Allures de la tension et du courant statoriques (avec convertisseur)

Figure III.9 (a): Zoom sur la tension et le courant statoriques (alimentation directe) ;

Figure III.9 (b) : Zoom sur la tension et le courant statoriques (avec convertisseur)

Figure III.10 (a): Allures de la tension et du courant rotoriques (alimentation directe) ;

Figure III.10 (b) : Allures de la tension et du courant rotoriques (avec convertisseur)

Figure III.11 (a): Zoom sur la tension et le courant rotoriques (alimentation directe) ;

Figure III.11 (b) : Zoom sur la tension et le courant rotoriques (avec convertisseur)

Figure III.12 (a): Allure de la puissance active rotorique (alimentation directe) ;

Figure III.12 (b) : Allure de la puissance active rotorique (avec convertisseur)

Figure III.13 (a): Allure de la puissance réactive (alimentation directe)

Figure III.13 (b) : Allure de la puissance réactive (avec convertisseur)

Figure III.14 (a): Allures de la tension et du courant statoriques (alimentation directe)

Figure III.14 (b) : Allures de la tension et du courant statoriques (avec convertisseur)

Figure III.15 (a): Zoom sur la tension et le courant statoriques (alimentation directe)

Figure III.15(b) : Zoom sur la tension et le courant statoriques (avec convertisseur)

Figure III.16 (a): Allures de la tension et du courant rotoriques (alimentation directe)

Figure III.16(b) : Allures de la tension et du courant rotoriques (avec convertisseur)

Figure III.17 (a): Zoom sur la tension et le courant rotoriques (alimentation directe)

Figure III.17 (b): Zoom sur la tension et le courant rotoriques (avec convertisseur)

Figure III.18 (a): Allure de la puissance active (alimentation directe)

Figure III.18 (b): Allure de la puissance active (avec convertisseur)

Figure III.19 (a): Allure de la puissance réactive (alimentation directe)

Figure III.19 (b): Allure de la puissance réactive (avec convertisseur)

Sommaire

Liste des symboles abrégés	
Liste des figures	
Sommaire	
Introduction générale.....	01
Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétiques	
I.1 Introduction.....	02
I.2 Principe de fonctionnement de la conversion de l'énergie éolienne	02
I.3 Capacité mondiale totale d'installation de l'énergie éolienne	03
I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	04
I.4.1 Avantages	04
I.4.2 Inconvénients	04
I.5 Types d'éolienne	04
I.5.1 Éoliennes à axe vertical	05
I.5.2 Éoliennes à axe horizontal	05
I.6 Configurations des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.....	06
1.6.1 Éolienne à vitesse constante.....	06
I.6.2 Eolienne à vitesse variable	07
I.6.2.1 Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone (GS)	07
I.6.2.2 Éolienne à vitesse variable avec génératrice asynchrone à cage.....	08
I.6.2.3 Eolienne à vitesse variable utilisant une MADA	08
I.6.3 Comparaison entre les deux types de fonctionnement.....	09
I.6.4 Modes de fonctionnement de la MASRB	09
I.7 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à rotor bobiné	10
I.7 Quelques types des systèmes autonomes	11
I.7.1 Système photovoltaïque autonome	11
I.7.2 Groupe électrogène	12

I.7.3 Éoliennes en mode autonome.....	13
I.7.3.1 Système éolien autonome basé sur une MSAP	13
I.7.3.2 Système éolien autonome basé sur une MAS	14
I.7.3.3 Système éolien autonome basé sur une machine asynchrone à rotor bobiné.....	15
I.8 Conclusion	15
Chapitre II : Modélisation des différentes parties del'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné	
II.1 Introduction.....	17
II.2 Description générale du système étudié.....	17
II.3 Modélisation des différentes parties de système éolienne étudié à base d'une MASRB.....	17
II.4 Modélisation de la partie mécanique	18
II.4.1 Modélisation du vent	18
II.4.2 Modélisation de la turbine éolienne.....	18
II.4.3 Modèle de multiplicateur.....	20
II.5 Modélisation de la partie électrique de la MASRB	21
II.5.1 Principe de fonctionnement de la MASRB	21
II. 5.2. Hypothèses simplificatrices de la MASRB.....	21
II.5.3 Modèle de la MASRB dans le repère abc.....	21
II.5.4 Modèle de la MASRB dans le repère (dq).....	24
II.5.5 Modélisation de convertisseur MLI	26
II.5.6 la technique de la commande MLI	28
II.5.7 Modélisation de la charge.....	29
II.6 Conclusion	29
Chapitre III : Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié	
III.1 Introduction	31
III.2 Présentation du système global basé sur la MASRB.....	31
III.3 Simulation et analyse des résultats pour le système autonome étudié.....	32
II.4 Conclusion	39
Conclusion générale	41

Bibliographie

Annexe

Introduction

générale

Introduction générale

La maîtrise de l'énergie est donc le moteur de l'activité humaine, autant elle fut un facteur de construction et de création de richesse. D'une part, l'évolution démographique de la planète, implique une progression durable des besoins énergétiques. De plus, la consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) et rapproche l'échéance de leur épuisements [19].

Les énergies renouvelables occupent une place de plus en plus importante dans la transition énergétique mondiale. Contrairement aux sources d'énergie fossiles, telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, les énergies renouvelables se caractérisent par leur capacité à se régénérer naturellement et à avoir un impact environnemental réduit. Parmi les principales sources d'énergies renouvelables, on trouve l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et biomasse [20].

Actuellement, l'énergie éolienne est l'une de ces énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique, aussi bien pour des sites isolés que comme pour les réseaux connectés. Le développement à grande échelle de l'utilisation des chaînes de conversion de l'énergie éolienne a poussé les gouvernements à investir dans le développement dans des stratégies qui permettent de faciliter le processus de conversion et d'obtenir une meilleure énergie électrique[20].

A l'heure d'aujourd'hui, une grande partie des consommateurs d'énergie électrique sont connectés au réseau public. Toutefois, l'électrification rurale et des sites isolés représentent un domaine où les technologies renouvelables peuvent se développer de manière significative.

Ce mémoire est constitué d'une introduction générale, trois chapitres, une conclusion générale et une bibliographie.

Le premier chapitre est consacré sur les généralités des différents systèmes énergétiques. Il décrit les différentes architectures adoptées dans les systèmes autonomes. Ensuite, on va citer les différentes machines qu'on peut utiliser dans les systèmes autonomes.

Le deuxième chapitre est destiné à la modélisation de la turbine éolienne de la machine asynchrone à rotor bobiné, du convertisseur statique et de la charge résistive.

Le troisième chapitre est dédié à la régulation de la MASRB on va utiliser une technique de commande à base des régulateurs PI a été abordée en prenant comme grandeurs de commande les tensions rotoriques, et on va interpréter les résultats de la simulation du système global.

Chapitre I
Généralités sur les
Différents Systèmes
Énergétiques

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

I.1 Introduction

L'éolien en fonctionnement autonome représente une avancée majeure dans le domaine des énergies renouvelables, offrant une solution adaptée aux besoins énergétiques dans des régions éloignées ou isolées des réseaux électriques classique. En utilisant la puissance du vent, ces systèmes fournissent une source d'énergie propre et fiable, indépendamment des infrastructures électriques classiques. Leur flexibilité les rend attrayants pour diverses applications, allant des petites installations domestiques aux projets industriels en milieu isolé. Dans la première partie de ce chapitre, nous commençons par la description de différentes machines qu'on peut utiliser en fonctionnement autonome. Dans la deuxième partie est consacré pour la machine asynchrone à rotor bobiné. Enfin, nous choisissons l'architecture qui fera l'objet de notre étude en fonctionnement autonome.

I.2 Principe de fonctionnement de la conversion de l'énergie éolienne

Les éoliennes transforment l'énergie cinétique du vent en électricité en deux étapes. D'abord, la turbine, capte une partie de l'énergie cinétique disponible du vent et la convertit en énergie mécanique. Ensuite, le générateur transforme cette énergie mécanique en électricité, qui est ensuite acheminée via le réseau électrique. Ainsi, une conversion et une transmission régulières de l'énergie sont nécessaires (figureI.1) [1].

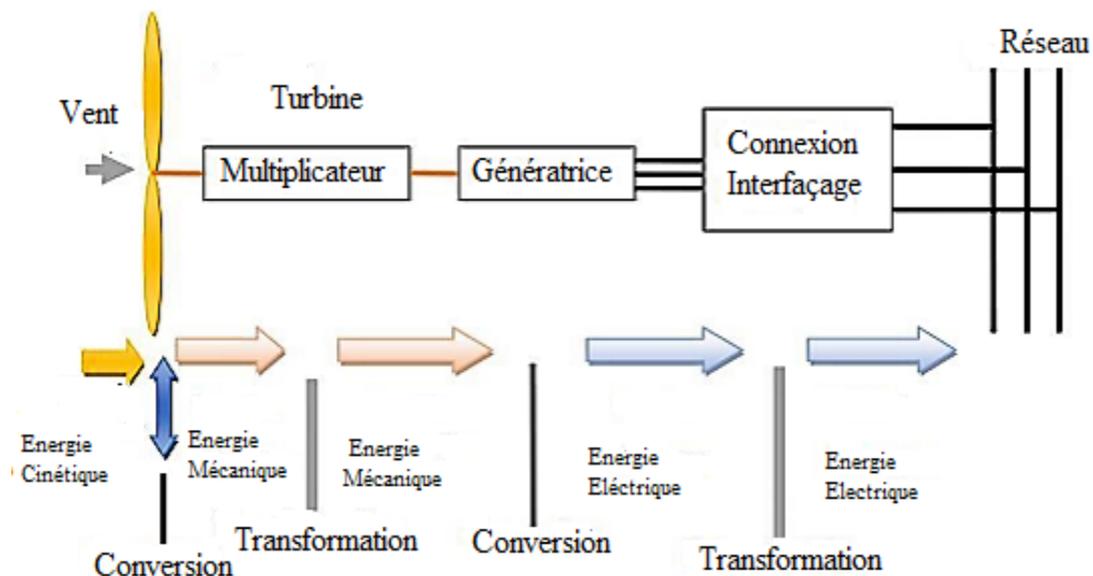


Fig I.1 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne [1]

Les éoliennes sont constituées d'une tour haute pour minimiser les perturbations, avec un mât légèrement plus grand que le diamètre du rotor. La nacelle abrite les composants mécaniques qui relient le rotor au générateur, ainsi que le système de freinage, les systèmes d'orientation des pales et de la nacelle, et les systèmes de refroidissement et de gestion de l'énergie. Le rotor, composé de 1 à 3

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

pales fixées à un moyeu, est généralement tripale, offrant ainsi un bon compromis entre coût, vibrations, impact visuel, bruit, et gestion électronique (figureI.2).

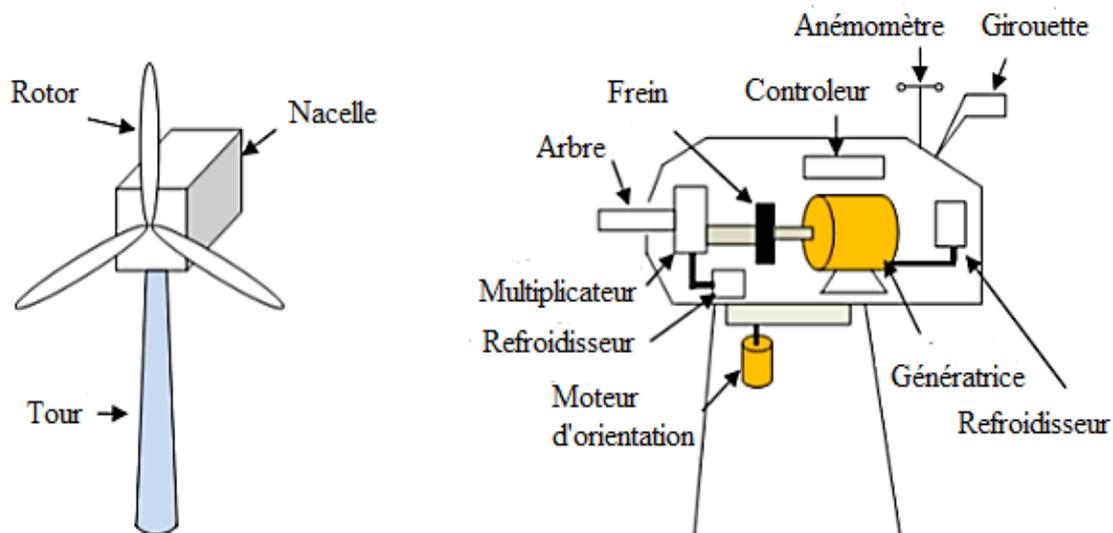


Fig. 1.2 Composants principaux d'une éolienne

I.3 Capacité mondiale totale d'installation de l'énergie éolienne

En 2022, le monde a installé 78 GW de nouvelle capacité éolienne, atteignant un total de 906 GW, avec une croissance annuelle de 9%. En 2023, on prévoit que les nouvelles installations dépasseront 100 GW, avec une croissance attendue de 15%. GWEC prévoit 680 GW supplémentaires pour les cinq prochaines années, soit 136 GW par an, et une augmentation totale de 1221 GW entre 2023 et 2030. Malgré une légère diminution des parts de marché globales, en partie à cause de la baisse des parts des deux plus grands marchés, la Chine et les États-Unis, les perspectives restent positives jusqu'en 2030 figure(I.3) [2].

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

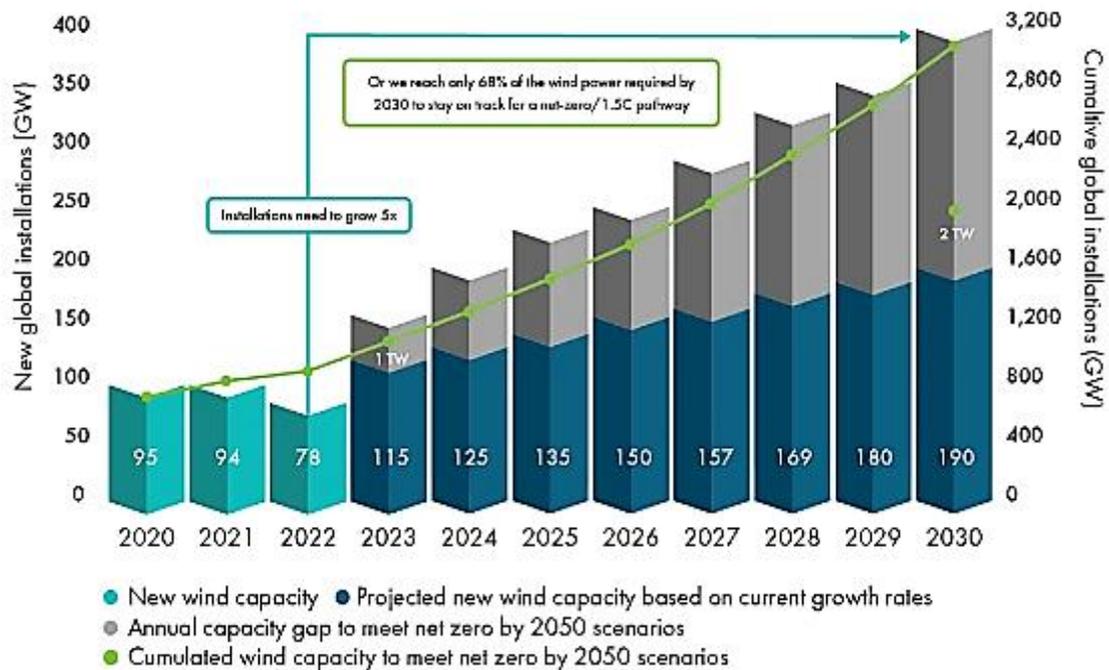


Fig.1.3 : Capacité mondiale installée en GW

I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.4.1 Avantages

- Énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement, produisant peu ou pas de CO₂ ;
- Coûts moins élevés par rapport aux autres énergies renouvelables après l'énergie hydraulique ;
- Source locale réduisant les pertes liées au transport de l'énergie, avec un impact économique positif, notamment en milieu rural ;
- Facilité d'installation et d'intégration dans les systèmes électriques existants, particulièrement dans les pays en développement.

I.4.2 Inconvénients

- Bruit aérodynamique causé par la rotation des rotors ;
- Dépendance à la géographie, aux conditions météorologiques et à l'environnement ;
- Nature intermittente de l'énergie éolienne, rendant difficile son rôle exclusif dans les politiques énergétiques.

I.5 Types d'éolienne

Il existe deux types principaux d'éoliennes, selon l'orientation de leur axe : vertical ou horizontal.

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

I.5.1 Éoliennes à axe vertical

a. Avantages : Fonctionnent dans toutes les directions de vent sans besoin d'orientation ; générateur et commandes au sol, facilitant la maintenance ; conception simple et robuste avec peu d'entretien ; faible bruit [3].

b. Inconvénients : Moins puissantes en raison de leur proximité au sol ; moins efficaces que les éoliennes à axe horizontal ; nécessitent plus d'espace au sol (figure I.4) [3].

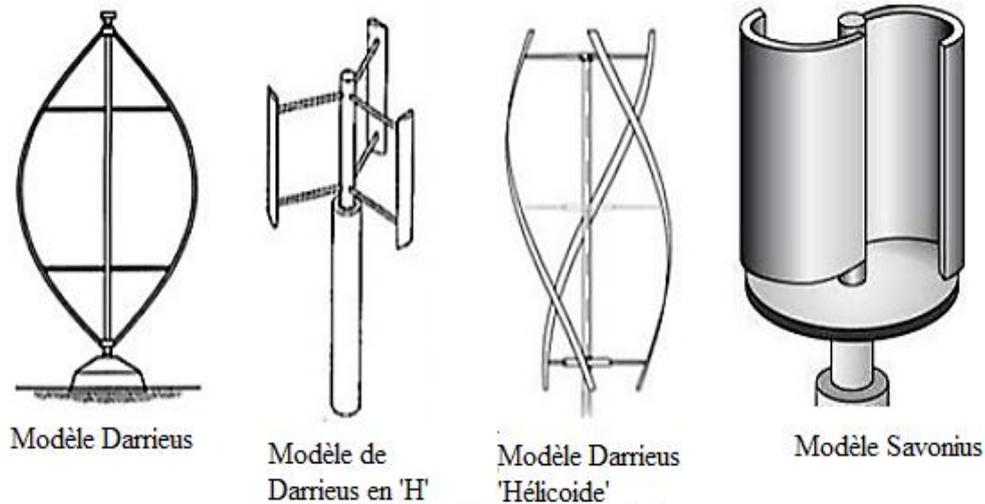


Fig. 1.4 : Eoliennes à axe vertical

I.5.2 Éoliennes à axe horizontal

a. Avantages : Captent des vents plus forts en hauteur, offrant un bon rendement ; faible emprise au sol ; pas besoin de local séparé pour le générateur.

b. Inconvénients : Coûts de construction élevés ; doivent être renforcées contre les vents violents ; installation bruyante (figure I.5)

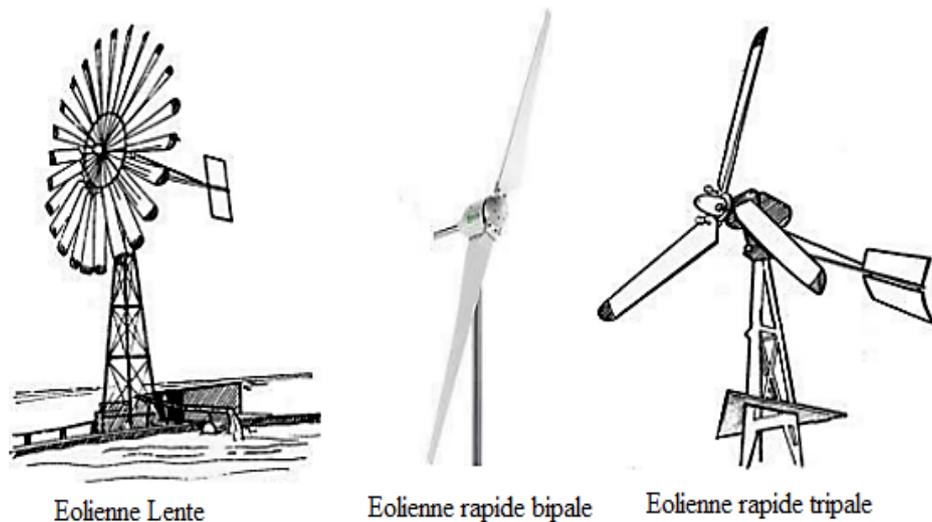


Fig. I.5 : Eoliennes à axe horizontal

I.6 Configurations des systèmes de conversion de l'énergie éolienne

Les architectures des chaînes de conversion de l'énergie éolienne sont principalement déterminées par le type de génératrice employée et la configuration du convertisseur de puissance, qui régule l'énergie générée. On distingue deux grandes catégories de configurations:

- La configuration avec génératrice à vitesse fixe (indépendamment de la turbine).
- La configuration avec génératrice à vitesse variable.

1.6.1 Éolienne à vitesse constante

Dans cette configuration, le générateur utilisé est généralement une machine asynchrone à cage, fonctionnant à une vitesse fixe ou avec une légère variation, en ajustant le glissement de la machine. Le composant le plus complexe et le plus coûteux de cette chaîne de conversion est le multiplicateur de vitesse à rapport variable (boîte à vitesse), qui assure une vitesse quasi constante du générateur. Les premières éoliennes déployées à grande échelle par les industriels reposaient sur cette configuration, dans laquelle la génératrice asynchrone est directement connectée au réseau électrique, (figure 1.6). Cette connexion directe est possible grâce au multiplicateur de vitesse et à la commande d'orientation des pales (Pitch contrôle), qui maintiennent une vitesse de générateur approximativement constante. La complexité du multiplicateur mécanique de vitesse, qui augmente la masse de l'éolienne et accroît les coûts de maintenance, constitue le principal inconvénient de cette configuration.

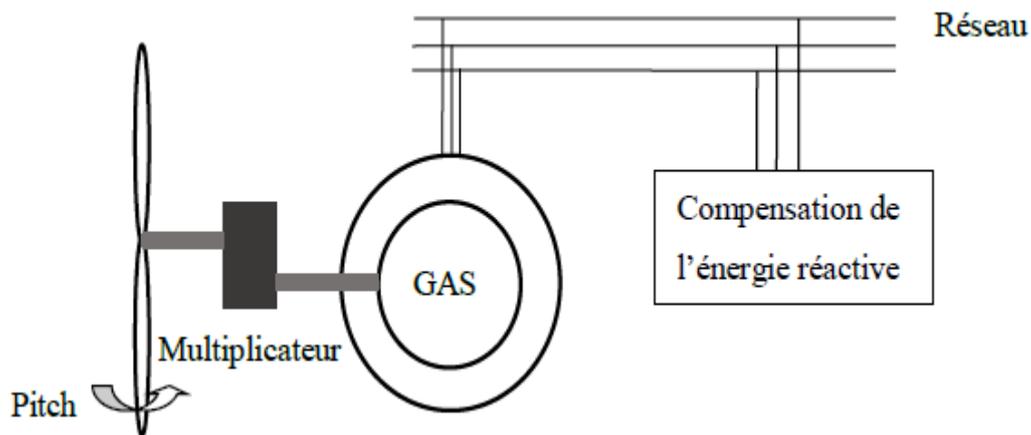


Fig I.6 Éolienne à vitesse constante avec génératrice asynchrone

I.6.2 Eolienne à vitesse variable

Dans l'industrie, les éoliennes à vitesse variable sont aujourd'hui les plus répandues. Le terme 'vitesse variable' désigne une turbine dont la vitesse de rotation est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal de l'exploitation en vitesse variable réside dans l'optimisation de la capture de l'énergie éolienne. Les éoliennes à vitesse variable peuvent utiliser les types de générateurs suivants: à rotor bobiné ou à aimants permanents, asynchrones à cage d'écureuil ou à rotor bobiné.

I.6.2.1 Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone (GS)

Pour que le générateur fonctionne correctement, le champ magnétique du rotor doit être synchronisé avec celui du stator, ce qui implique que la vitesse de rotation du générateur doit correspondre à un multiple de la fréquence des courants du stator. Les variations de la vitesse du vent entraînent des fluctuations dans la vitesse de la génératrice, affectant ainsi la fréquence et l'amplitude des tensions du stator. Pour synchroniser le générateur avec le réseau électrique sans recourir à une coûteuse boîte à vitesse, une interface électronique de puissance est utilisée. Cette interface permet un fonctionnement à vitesse variable sur une large gamme de conditions de vent, toutefois, le passage de toute l'énergie produite à travers le convertisseur de puissance augmente les pertes par commutation, ce qui réduit le rendement global de l'éolienne [4]. Les génératrices synchrones à rotor bobiné sont peu courantes dans les éoliennes. En revanche, les générateurs synchrones à aimants permanents ont récemment été

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

adoptés pour les éoliennes offshore de grande puissance et les éoliennes de petites puissances. Leur utilisation est limitée en raison du coût élevé des aimants (fabriqués à partir de terres rares) et de leur démagnétisation progressive causée par les fortes températures et les champs magnétiques intenses du générateur. La figure 1.7 illustre une chaîne de conversion avec une génératrice synchrone et un convertisseur de puissance, incluant un redresseur côté stator et un onduleur côté réseau. Les générateurs synchrones à aimants permanents avec de nombreux pôles permettent de fonctionner sans multiplicateur mécanique de vitesse [4].

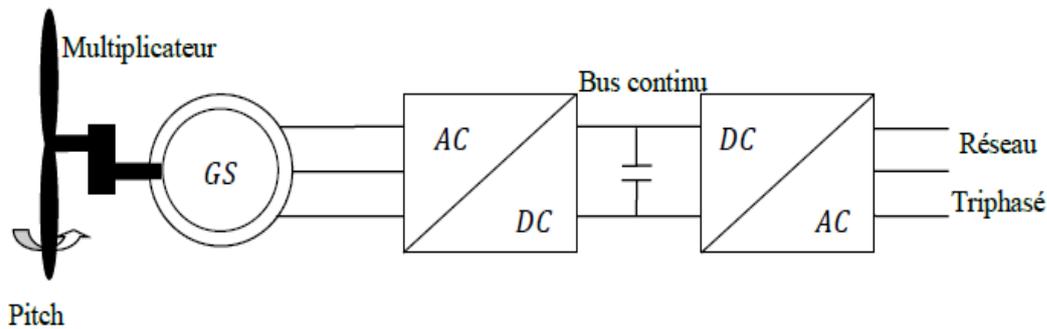


Figure I.7 Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone

I.6.2.2 Éolienne à vitesse variable avec génératrice asynchrone à cage

Dans cette configuration, l'éolienne entraîne une génératrice asynchrone, souvent de type à cage, qui est connectée au réseau électrique à travers un convertisseur de puissance placé sur le circuit du stator, comme le montre la figure 1.8 [5].

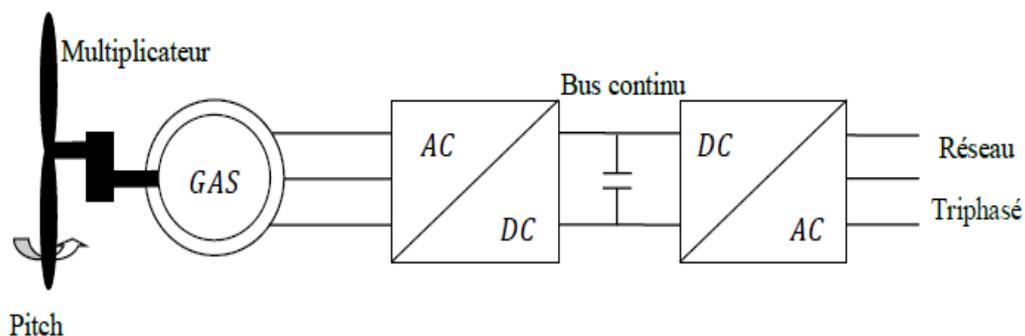


Figure I.8 - Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone

I.6.2.3 Eolienne à vitesse variable utilisant une MADA

A ce jour, la majorité des projets éoliens de grande puissance on-shore s'appuient sur l'utilisation de la machine asynchrone à rotor bobiné, communément appelée machine asynchrone à double alimentation (MADA) [6]. Le terme 'double alimentation' désigne l'alimentation en tension des deux enroulements

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

de la machine, à savoir le stator et le rotor. C'est ce type de machine qui a été sélectionné pour l'étude réalisée dans notre travail. Les éoliennes à rotor bobiné utilisent une interface d'électronique de puissance pour découpler partiellement la vitesse du rotor de la fréquence du réseau, permettant un contrôle indépendant des puissances active et réactive. Cette conception réduit les coûts et en fait un système de conversion d'énergie éolienne largement accepté (figure I.9) [7].

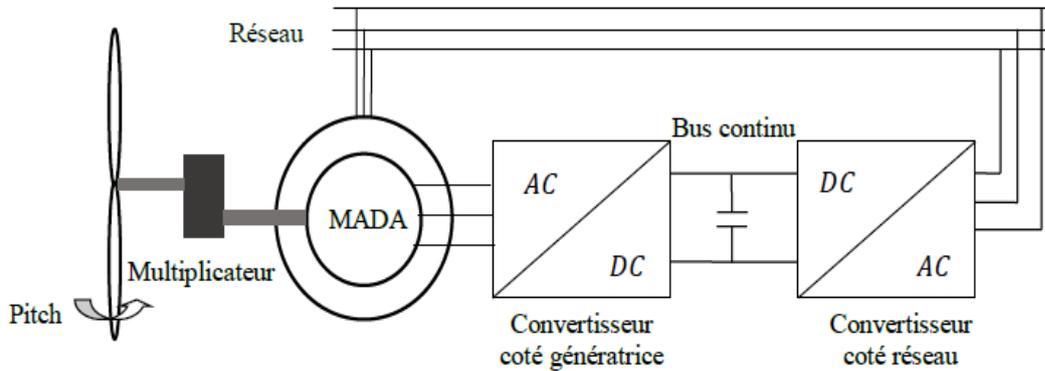


Figure I.9 Eolienne à vitesse variable utilisant une MAS à rotor bobiné

I.6.3 Comparaison entre les deux types de fonctionnement

Le tableau I.1 compare les deux types de génération d'électricité : à vitesse fixe et à vitesse variable [8].

Éolienne à vitesse fixe	Éolienne à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Coût réduit ✓ Entretien fréquent du multiplicateur de vitesse ✓ Rendement limité ✓ Système électrique simple 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fonctionnement à vitesse variable ✓ Production d'une électricité de meilleure qualité ✓ Diminution des oscillations du couple ✓ Efficacité énergétique optimisée

I.6.4 Modes de fonctionnement de la MASRB

Un des atouts de la MASRB est sa capacité à fonctionner dans les quatre quadrants du plan Couple-Vitesse, que ce soit en mode moteur ou générateur, et à des vitesses hypo-synchrones ou hyper-synchrones. Cette polyvalence est assurée par la régulation des tensions rotoriques, qui permet de contrôler le champ magnétique, comme le montre la figure I.10. P_s , P_r et P_m désignent respectivement, la puissance du stator, du rotor et mécanique. Pour une utilisation

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

de la MASRB dans un système éolien, elle fonctionne en mode générateur dans les quadrants inférieurs. En hypo-synchronisme, le rotor absorbe la puissance P_r , tandis qu'en hyper-synchronisme, il fournit cette puissance. La plage de variation de vitesse généralement ne dépassant pas $\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisme, permet de gérer une puissance entre 0,7 et 1,3 fois la puissance nominale, réduisant ainsi la taille et le coût des convertisseurs, ainsi que les besoins en refroidissement [10].

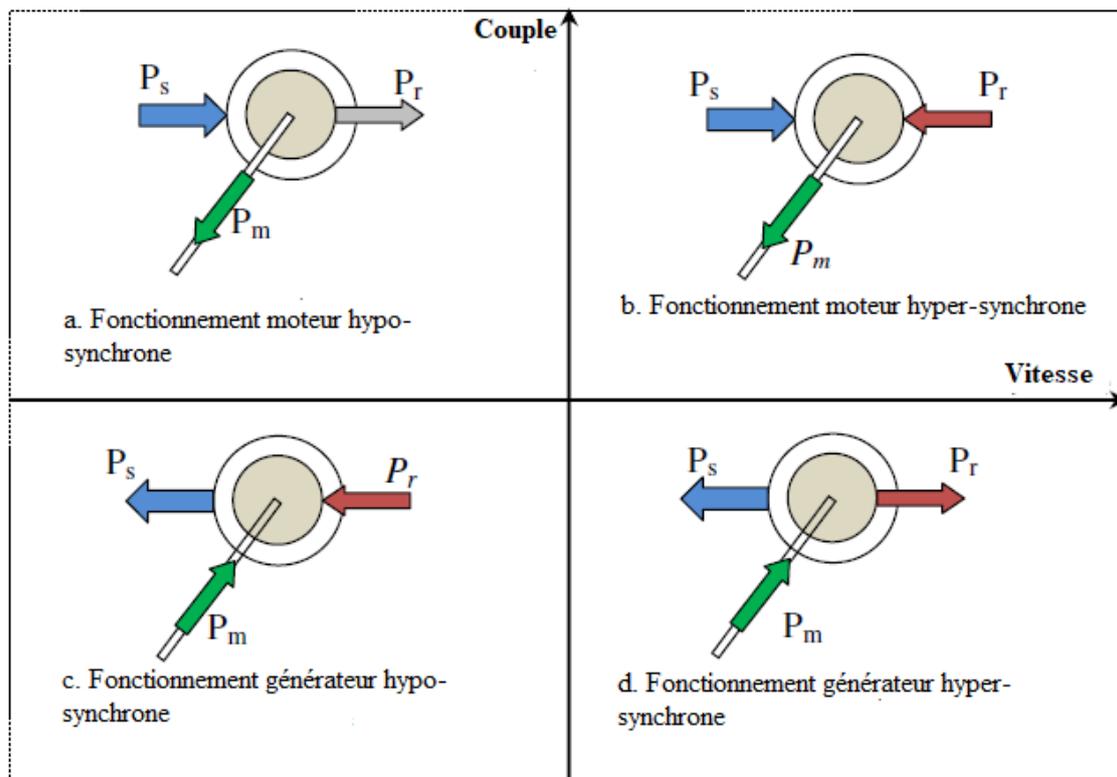


Fig.I.10 Modes de fonctionnements caractéristiques de la MASRB [11]

I.7 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à rotor bobiné

De nos jours, ce type de générateur est largement reconnu comme l'un des systèmes de conversion d'énergie éolienne les plus adaptés.

Les avantages de l'utilisation de la machine asynchrone à rotor bobiné (MASRB) dans les systèmes éoliens peuvent être résumés comme suit [9] :

- Capacité à fonctionner sur une large plage de vitesses du vent;
- Amélioration de l'efficacité du système, notamment en réduisant les pertes dans les petits convertisseurs et les filtres harmoniques;

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

- Réduction des coûts de production grâce à la taille réduite des convertisseurs et des filtres;
- Possibilité de produire une puissance électrique supérieure à la valeur nominale;
- Capacité à contrôler le facteur de puissance.

Cependant, le principal inconvénient de cette configuration est la nécessité d'entretenir le système bague-balais utilisé pour alimenter le rotor de la génératrice.

I.7 Quelques types des systèmes autonomes

I.7.1 Système photovoltaïque autonome

Les premiers systèmes d'électrification photovoltaïque reposaient sur le courant continu (CC), efficace pour les petits consommateurs isolés jusqu'à 100 W. Cependant, le courant alternatif (CA) est souvent nécessaire pour alimenter des moteurs et équipements industriels standard, généralement disponibles uniquement en CA [12]. Pour les applications autonomes, le pompage au fil du soleil représente la chaîne de conversion la plus simple, puisqu'il ne nécessite pas de stockage électrique, l'eau étant stockée dans un réservoir. Comme illustré à la figure I.11, connecter tous les panneaux en série permet d'optimiser le rendement et la puissance, même en cas d'occultation partielle des cellules [13].

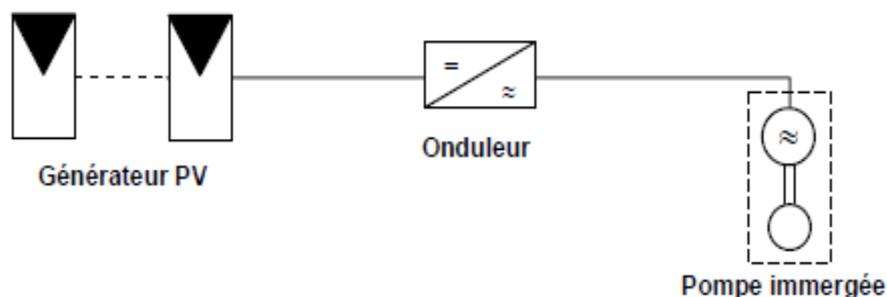


Figure I.11 Pompage au fil du soleil de petite puissance

Pour un système autonome de plus grande puissance (quelques kW), deux solutions sont possibles : connecter plusieurs panneaux en parallèle avec des diodes anti-retour, ou équiper chaque branche de panneaux en série de hacheurs indépendants (MPPT). Cette dernière maximise la puissance exploitable en cas d'occultation partielle des cellules (voir figure I.12).

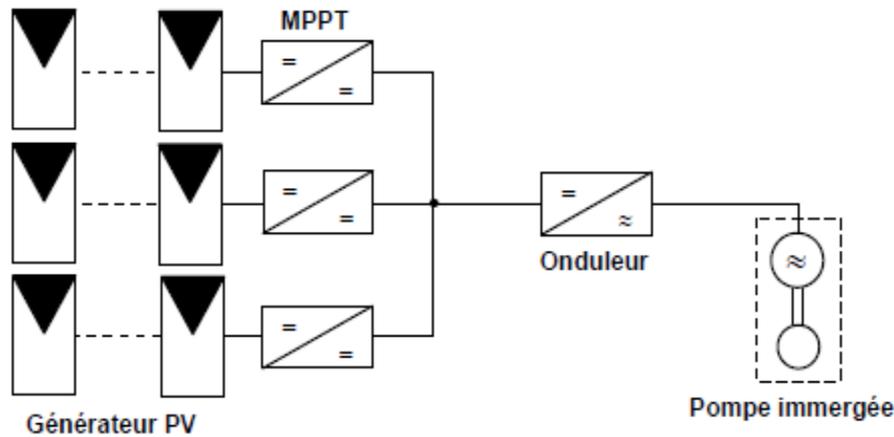


Figure I.12 Pompage au fil du soleil de forte puissance

L'utilisation de MPPT permet de suivre en continu le point de puissance maximale d'un panneau ou d'un champ photovoltaïque, optimisant ainsi le rendement. Ce point, sur la courbe courant-tension (I-V), correspond à la production maximale d'énergie [13]. Pour alimenter un petit site isolé, un système de stockage par accumulateur électrochimique est nécessaire (figure I.13). En général, on utilise un ou deux panneaux, fournissant une puissance de 50 à 100 Wc, avec une capacité d'accumulateur de 50 à 100 Ah. Pour les sites isolés de grande puissance, une architecture évoluée intègre plusieurs groupes de panneaux avec MPPT, un stockage plus important, et éventuellement une éolienne ou un générateur diesel, pour fournir une tension alternative conventionnelle (230V).

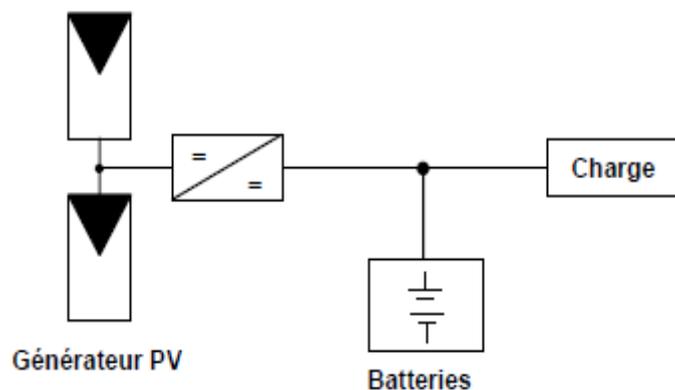


Figure I.13 Petit site isolé

I.7.2 Groupe électrogène

Un groupe électrogène est un dispositif autonome produisant de l'électricité, comme le montre la figure I.14, généralement composé d'un moteur thermique entraînant une génératrice. Sa taille et son poids varient considérablement. Les groupes électrogènes sont utilisés comme source d'énergie dans

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

des zones non raccordées au réseau électrique, pour des systèmes de secours nécessitant une alimentation fiable (comme dans les hôpitaux), et pour fournir de l'énergie auxiliaire afin de limiter la puissance de pointe sur le réseau. Ils peuvent fonctionner à des vitesses constantes ou variables. Les avancées en aimants permanents et en commutation électronique ont permis de développer des machines synchrones à coût compétitif, offrant une grande variété de configurations et une absence de contacts glissants grâce aux aimants permanents



Fig.I.14 Exemple de groupes électrogènes semi-industriels

I.7.3 Éoliennes en mode autonome

Dans de nombreuses régions isolées et venteuses, l'énergie éolienne représente la principale source potentielle d'électricité. La baisse des coûts des aérogénérateurs et des technologies électroniques, ainsi que les incitations gouvernementales, favorisent l'utilisation croissante des éoliennes autonomes dans ces zones. Contrairement aux éoliennes raccordées aux grands réseaux, les petits systèmes éoliens ne visent pas toujours à maximiser la conversion de la puissance éolienne, mais plutôt à produire une quantité suffisante d'énergie à un coût d'installation et de maintenance réduit. Ces systèmes sont conçus pour répondre à divers besoins énergétiques, allant de l'éclairage de base à l'électrification complète de villages. Nous présentons les différentes solutions de conversion d'énergie éolienne utilisées pour les systèmes isolés et autonomes.

I.7.3.1 Système éolien autonome basé sur une MSAP

Les éoliennes pour petits systèmes électriques isolés (≤ 10 kW) sont idéales pour produire de l'électricité à basse tension dans des zones isolées, comme des maisons, des bateaux ou des relais de télécommunication. Contrairement aux grandes éoliennes, ces systèmes utilisent généralement des générateurs à aimants permanents fonctionnant à vitesse variable,

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

nécessitant un convertisseur statique (AC/DC/AC) pour obtenir une tension alternative à fréquence constante. La figure I.15 illustre un système de plus en plus adopté par les fabricants. En cas de surcharge, un contacteur court-circuite l'induit de la génératrice, arrêtant ainsi la turbine, sans nécessiter de multiplicateur. Cette méthode, adaptée aux petites éoliennes, est plus fiable et économique en entretien. Les petites éoliennes utilisent des systèmes mécaniques de commande, tandis que les grandes éoliennes sont équipées de systèmes de commande électroniques. L'énergie produite par les petites éoliennes est plus coûteuse que celle des grandes, mais elle est principalement destinée à concurrencer d'autres sources d'énergie pour les sites isolés, comme les générateurs diesel ou les panneaux photovoltaïques [12].

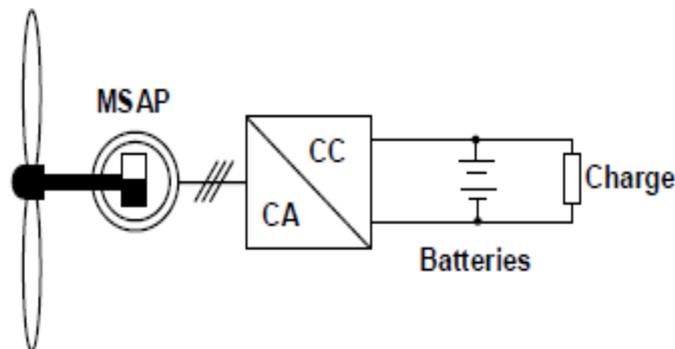
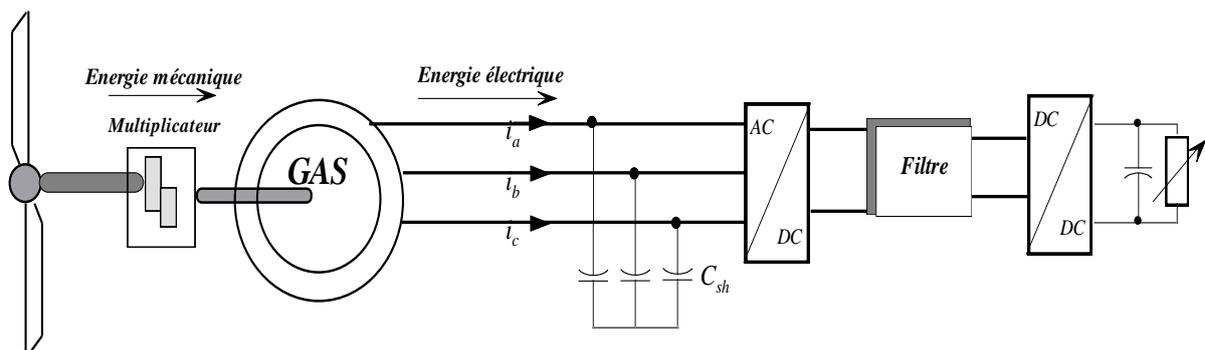


Figure I.15 Eolienne à aimants permanents débitant directement sur des batteries et une charges

I.7.3.2 Système éolien autonome basé sur une MAS

Le fonctionnement autonome de la génératrice asynchrone à cage est fortement influencé par les variations de la vitesse et de la charge. Elle génère de la puissance active tout en absorbant la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation. Le système comprend un redresseur à diodes, un filtre, et un hacheur de type survolteur/dévolteur. Pour maintenir une tension constante à la sortie du hacheur, on ajuste le rapport cyclique de celui-ci (figure I.16) [14].



Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

Fig.I.16 Générateur-connecté à un convertisseur unidirectionnel

I.7.3.3 Système éolien autonome basé sur une machine asynchrone à rotor bobiné

Le système de génération illustré sur la figure I.17 utilise une MASRB entraînée par une turbine éolienne à vitesse variable, fournissant de la tension à des charges isolées sans recours à une source auxiliaire [9]. La topologie adoptée pour le convertisseur électronique du rotor est la plus universelle, rendant le système compatible aussi bien en mode autonome qu'en mode connecté au réseau.

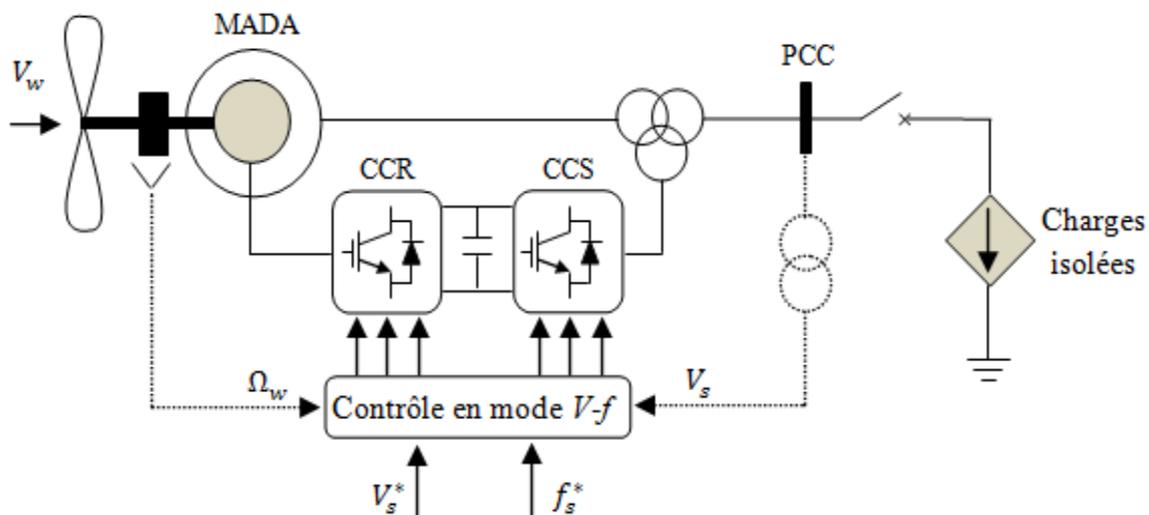


Fig.I.17 Schéma d'une installation autonome basée sur la MASRB

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une description de l'éolienne et les différents types de l'éolienne, dans la seconde partie on a élaboré un aperçu sur les systèmes connectés au réseau en fonctionnement à vitesse fixe et à vitesse variable ainsi que toutes les structures les plus répandues, notre travail est consacré sur l'utilisation de la conversion de l'énergie éolienne pour des sites isolés, dans la dernière partie de ce chapitre nous avons donné quelques différents systèmes autonomes.

Le prochain chapitre sera consacré sur la modélisation des différentes parties de chaîne de conversion à étudier à savoir : La machine asynchrone à rotor bobiné ; Convertisseur statique (AC/DC) ; Charge autonome.

Chapitre I : Généralités sur les Différents Systèmes Énergétique

Chapitre II

**Modélisation des
différentes parties de
l'éolienne à base
d'une machine MAS
à rotor bobiné**

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons modéliser les différents composants de la chaîne de conversion éolienne, qui se compose de deux parties : la partie mécanique et la partie électrique. Nous débuterons par la modélisation de la turbine éolienne, suivie de celle de la machine asynchrone à rotor bobiné (MASRB). Cette dernière est pilotée au niveau du rotor par un convertisseur MLI, tandis que le stator est directement relié à une charge triphasée équilibrée, fonctionnant en mode autonome. Le modèle triphasé généralisé de la machine sera d'abord présenté, avant d'introduire le modèle biphasé dans le repère de Park, ce qui permettra de simplifier l'analyse des grandeurs électriques.

II.2 Description générale du système étudié

Le schéma global du système éolien autonome étudié est illustré sur la figure II.1. La MASRB est entraînée par une turbine éolienne à vitesse variable, avec l'aide d'un multiplicateur de vitesse. Le rotor de la génératrice est contrôlé par un convertisseur MLI bidirectionnel, tandis que le stator est relié à une charge triphasée équilibrée. Où la source à courant continu

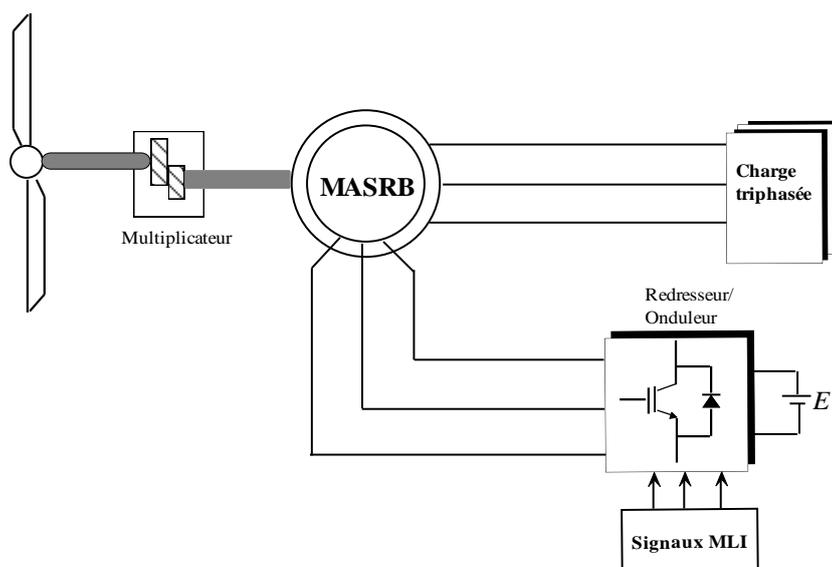


Figure II.1: Système éolien étudié basé sur une MASRB

II.3 Modélisation des différentes parties de système éolienne étudié à base d'une MASRB

La figure II.2 montre une turbine éolienne équipée de trois pales orientables, fixées sur un arbre. Cet ensemble mécanique est conçu pour tourner sous l'effet de l'énergie du vent. Chaque composant de ce système est soumis à trois types de contraintes : l'inertie, le frottement et la contrainte

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

élastique. En règle générale, l'arbre de la turbine entraîne la génératrice à l'aide d'un multiplicateur de vitesse .

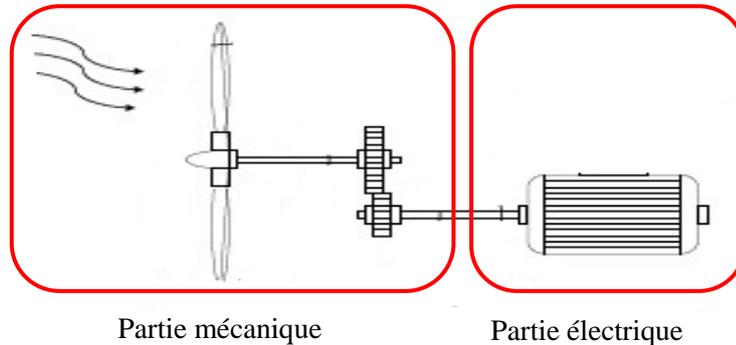


Figure II.2: Configuration d'une turbine éolienne

II.4 Modélisation de la partie mécanique

II.4.1 Modélisation du vent

La première étape essentielle pour réussir un projet de production éolienne est de choisir le bon emplacement. Ce choix est important car les caractéristiques du vent, comme sa vitesse et sa régularité, affectent directement l'efficacité du système de conversion d'énergie. En effet, la puissance du vent, dans des conditions idéales, est proportionnelle au cube de sa vitesse. Cela montre à quel point il est crucial d'évaluer les propriétés éoliennes du site pour maximiser la production d'énergie. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

II.4.2 Modélisation de la turbine éolienne

Le système de transmission est illustré à la figure II.3. Il se compose d'un arbre lent auquel sont connectés la turbine et l'entrée du multiplicateur de vitesse, et d'un arbre rapide à la sortie du multiplicateur, qui entraîne la génératrice.

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

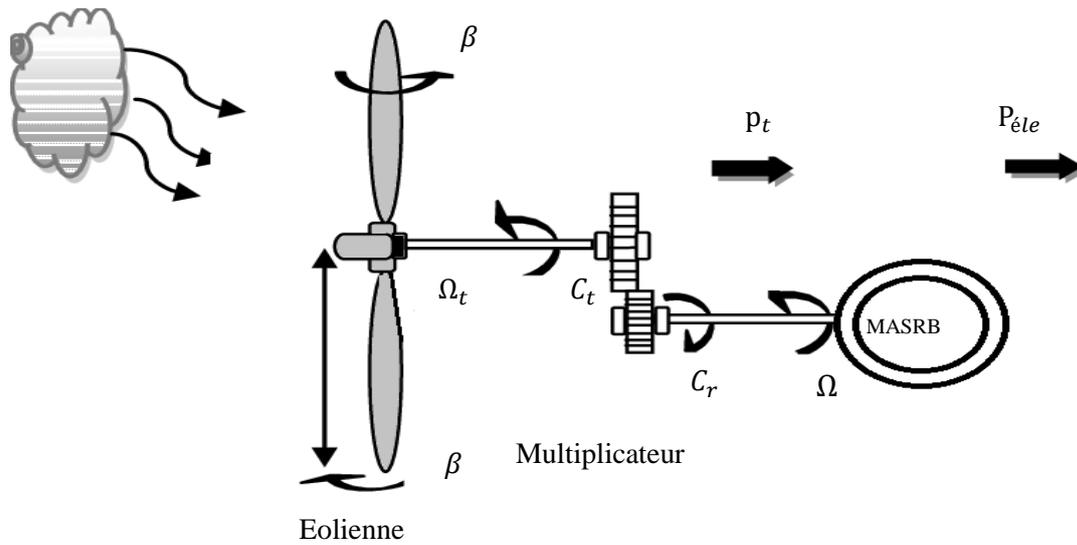


Figure II.3 Turbine éolienne reliée à un générateur par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse.

La formule (II.2) exprime la puissance du vent :

$$P = \frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot v^3 \quad (\text{II.1})$$

Avec : $S = \pi R^2$: Surface balayée par les pales de l'éolienne ; ρ : Masse volumique de l'air ;
 v : Vitesse du vent ; R : Rayon de la turbine.

La formulation de la puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine $P_{aér}$ est donnée sous la forme suivante :

$$P_{aér} = \frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot v^3 \quad (\text{II.2})$$

On utilise le C_p d'une éolienne de petite puissance est donnée par la formule suivante [1]:

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0,5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0,0068 \cdot \lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

La vitesse relative λ est définie comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales, selon la formule suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{II.4})$$

Le couple appliqué par le vent sur l'arbre lent de la turbine est déterminé par :

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II.5})$$

Où : β : est l'angle d'orientation des pales ; Ω_t : vitesse angulaire mécanique (rad /s mécanique) de la turbine λ : est le ratio de vitesse.

II.4.3 Modèle de multiplicateur

La figure II.4 présente le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice.

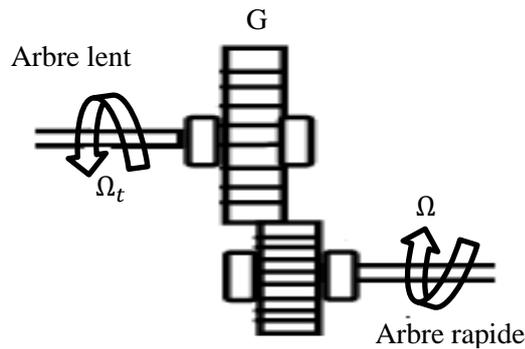


Figure II.4 structure d'un multiplicateur

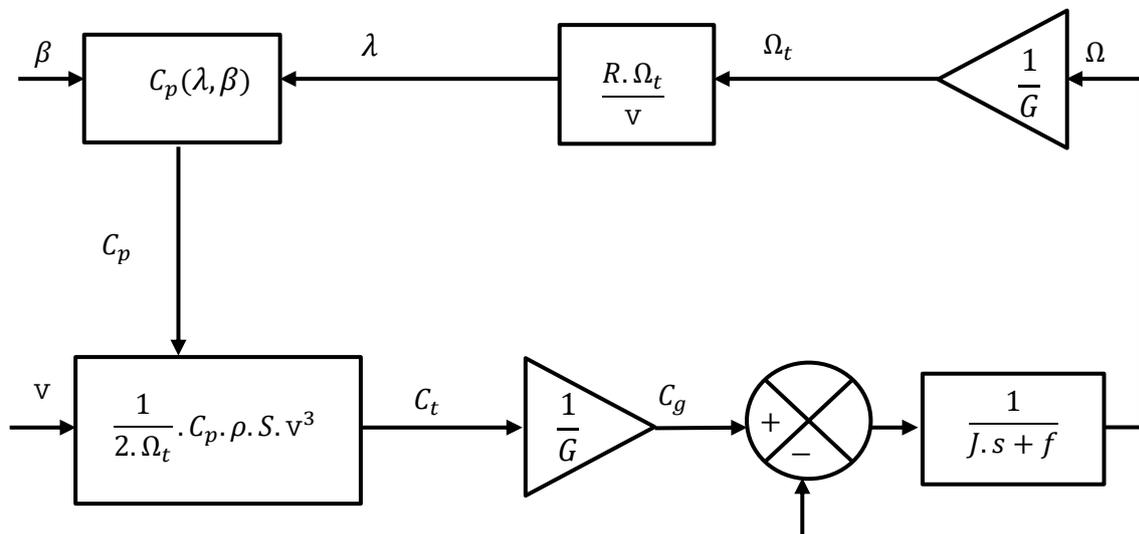
Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad (\text{II.6})$$

Les couples sur l'arbre lent C_t et sur l'arbre rapide C_r sont exprimés par :

$$C_r = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.7})$$

Le schéma bloc du modèle de la turbine est donné sur la figure II.5:



Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

Figure II.5 Schéma bloc du modèle de la turbine

II.5 Modélisation de la partie électrique de la MASRB

II.5.1 Principe de fonctionnement de la MASRB

Le principe de fonctionnement des MAS se base sur l'interaction entre des courants inducteurs et des courants induits (figure II.6). Dans ce cas le MAS est aussi de ce fait dénommée machine à induction, mais on trouve aussi des MAS à collecteurs à excitation sérié.

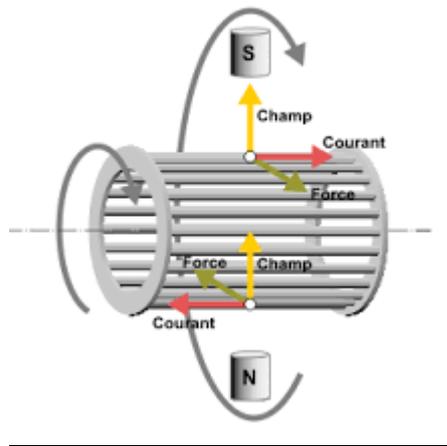


Figure II.6 Règle de la main droite

II. 5.2. Hypothèses simplificatrices de la MASRB

En raison de la complexité de construction, il est difficile d'effectuer une analyse exhaustive de la MASRB en se basant uniquement sur sa géométrie précise, ce qui rend nécessaire l'établissement des hypothèses simplificatrices :

- L'influence de l'effet de la température n'est prise en compte sur les résistances ;
- La machine est de construction symétrique ;
- Pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants, on suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé ;
- Les pertes ferromagnétiques sont négligées ;
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.

II.5.3 Modèle de la MASRB dans le repère abc

Equations électriques

Nous considérons le modèle de la MASRB sur la figure (II.7), La loi de Lenz associée à la loi d'Ohm permette de déduire les expressions des tensions des circuits statoriques et rotoriques :

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

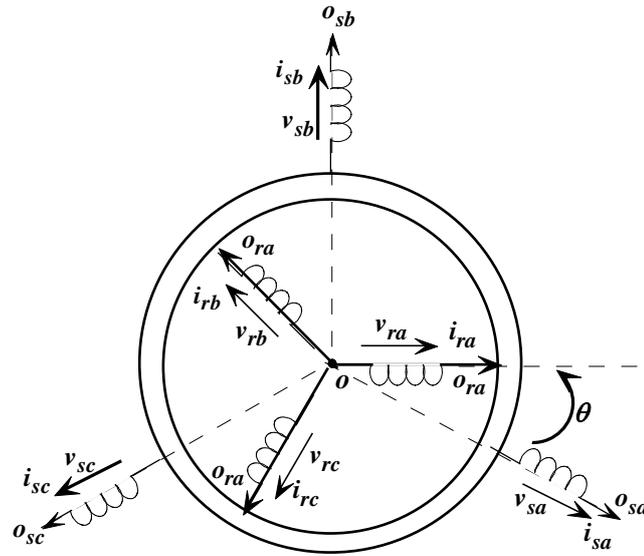


Figure II.7 Représentation schématique de deux enroulements statorique et rotorique de la MASRB

Les équations électriques générales de la MASRB dans le stator et rotor respectivement, s'expriment de la manière suivante :

Pour le stator :

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Où : R_s et R_r : Résistances d'une phase des enroulements du stator et du rotor, respectivement.

Sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_{ss}] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [v_r] = [R_{rr}] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Où : } [v_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}; [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix};$$

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}; [R_{ss}] = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [R_{rr}] = R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Equations magnétiques

✚ Equations magnétiques

Les relations entre flux et courants s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{rs}] \cdot [i_s] \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Tel que : $[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & \frac{-l_{ms}}{2} & \frac{-l_{ms}}{2} \\ \frac{-l_{ms}}{2} & l_s & \frac{-l_{ms}}{2} \\ \frac{-l_{ms}}{2} & \frac{-l_{ms}}{2} & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & \frac{-l_{mr}}{2} & \frac{-l_{mr}}{2} \\ \frac{-l_{mr}}{2} & l_r & \frac{-l_{mr}}{2} \\ \frac{-l_{mr}}{2} & \frac{-l_{mr}}{2} & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = l_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Avec

$$l_m = l_{ms} = l_{mr}$$

Avec : $[L_{ss}]$; $[L_{rr}]$: Matrices des inductances propres et mutuelles du stator et du rotor, respectivement ; $[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor ; L_s ; L_r : Inductances propres statorique et rotorique, respectivement ; M_r ; M_s : Inductance mutuelle statorique et rotorique.

En remplaçons les équations (II.13) dans les équations (II.12), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_{ss}] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [i_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \\ [v_r] = [R_{rr}] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [i_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [i_s]) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

✚ Equation mécanique

L'équation mécanique est donnée par la relation suivante :

$$C_g - C_{em} - C_{vis} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.14})$$

II.5.4 Modèle de la MASRB dans le repère (dq)

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

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

La transformation de Park permet le passage d'un repère triphasé (abc) à un repère fictif tournant biphasé (dq). Dans la suite de ce travail, la composante homopolaire sera négligée.

La transformation de Concordia permet de transformer l'enroulement triphasé de chaque armature de la machine en un enroulement diphasé magnétiquement équivalent. Le stator et le rotor sont alors diphasés avec deux axes (α, d) en quadrature. Là encore, il y a mouvement relatif entre le stator et le rotor comme illustré sur la (figure II.7).

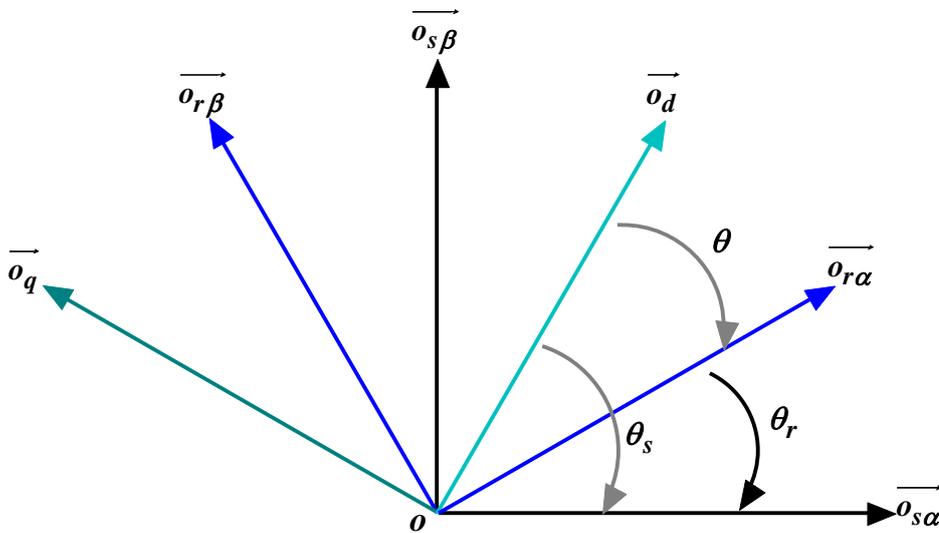


Figure II.8 Repère de référence : statorique $s\alpha - s\beta$; rotorique $r\alpha - r\beta$; tournant dq

La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles θ_s et θ_r , celle-ci s'exprime par :

$$\theta_s = \theta_r + \theta \quad (\text{II.15})$$

La matrice de transformation de Park qui permet le passage d'un système triphasé (abc) vers un système biphasé tournant (dqo) avec conservation de puissance est défini comme suit :

Pour le stator :

$$[P(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Pour le rotor :

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

$$[P(\theta - \theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Pour faire la transformation de Park inverse, la matrice de transformation est définie comme suit :

Pour le stator :

$$[P^{-1}(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Pour le rotor :

$$[P^{-1}(\theta_s - \theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s - \theta_r) & -\sin(\theta_s - \theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

A. Equations électriques de la machine asynchrone à rotor bobiné

En appliquant la transformation de Park aux équations de la MASRB, on trouve :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{rq} \\ v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

On peut écrire l'équation au stator et rotor sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_s - \omega_r \\ \omega_s - \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

B. Equations magnétiques

Les relations entre les flux et les courants sont donnés par le système d'équations suivant :

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = M i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \Phi_{qr} = M i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec : $L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique du stator ; $L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique du rotor ; $M = \frac{3}{2} M_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

C. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique en fonction des flux et courants statoriques est donné par :

$$C_e = P(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.23})$$

Avec : P : Nombre de pair de pôles.

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont donné par la forme suivante :

$$\begin{cases} P_{sa} = v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq} \\ Q_{sa} = v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq} \\ P_{ra} = v_{rd} \cdot i_{rd} + v_{rq} \cdot i_{rq} \\ Q_{ra} = v_{rq} \cdot i_{rd} - v_{rd} \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

II.5.5 Modélisation de convertisseur MLI

Pour produire un courant alternatif sur une charge, il est nécessaire d'utiliser un onduleur, un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. Une configuration intéressante est celle du convertisseur MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions), qui utilise deux ponts triphasés d'IGBT, commandés par la technique de modulation de largeur d'impulsions. Afin de simplifier l'analyse, nous ferons l'hypothèse que.

- La commutation des interrupteurs est instantanée ;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé ;

Un onduleur de tension est donné par la figure II.8

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

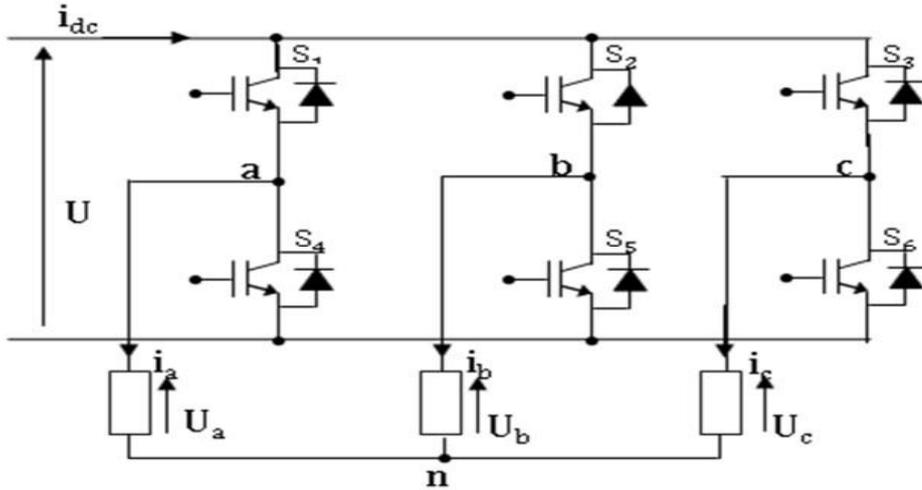


Figure II.8 Schéma d'un onduleur de tension triphasé [26]

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{an} - U_{no} \\ U_{bc} = U_{bn} - U_{no} \\ U_{ca} = U_{cn} - U_{no} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

La somme des tensions simples entre les différentes phases est égale à zéro, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Ces tensions peuvent être exprimées en fonction des tensions de sortie de l'onduleur, en tenant compte de la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence.

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nno} = V_{nno} \\ V_{bn} + V_{nno} = V_{bno} \\ V_{cn} + V_{nno} = V_{cno} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nno} = \frac{1}{3}[V_{ano} + V_{bno} + V_{cno}] \quad (\text{II.28})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits Si ($i = a, b, c$), U_{dc}

$$V_{ino} = S_i \cdot U_{dc} - \frac{U_{dc}}{2} = (S_i - 0,5)U_{dc} \quad (\text{II.29})$$

On trouve donc :

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

$$\begin{cases} V_{ano} = (S_a - 0,5)U_{dc} \\ V_{bno} = (S_b - 0,5)U_{dc} \\ V_{cno} = (S_c - 0,5)U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

En remplaçant dans le système d'équations, on obtient

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ano} - \frac{1}{3}V_{bno} - \frac{1}{3}V_{cno} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ano} + \frac{2}{3}V_{bno} - \frac{1}{3}V_{cno} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ano} - \frac{1}{3}V_{bno} + \frac{2}{3}V_{cno} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

En remplace dans les équations présidentes, on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Afin de générer un courant sur la charge continu, on est appelé à utiliser un redresseur, qui est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension alternative en une énergie à tension continu.

$$i_{dc} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \quad (\text{II.33})$$

Avec

i_{dc} : Courant redressé :

$S_a S_b S_c$: Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.5.6 la technique de la commande MLI

L'objectif de la MLI est de minimiser ou réduire les oscillations de la vitesse, du couple et des courants. Cela permet de diminuer la pollution harmonique du réseau électrique, de minimiser les pertes dans le système, et ainsi d'augmenter le rendement global [3].

Les deux caractéristiques de la MLI : [3]

➤ Indice de modulation m : Il correspond au rapport entre la fréquence de modulation (porteuse) f_p et la fréquence de référence $f_{réf}$. Une augmentation de la valeur de m déplace les harmoniques vers des fréquences plus élevées, ce qui peut être avantageux. Cependant, cela entraîne également une augmentation des pertes de tension, rendant nécessaire une optimisation de la valeur de m .

$$m = \frac{f_p}{f_{réf}} \quad (\text{II.34})$$

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

➤ Taux de modulation r : Il s'agit d'un coefficient de réglage de la tension, défini comme le rapport entre l'amplitude de la tension de référence $v_{réf}$ et l'amplitude de la porteuse v_p .

$$r = \frac{v_{réf}}{v_p} \quad (II.35)$$

Le schéma de principe est donné sur la figure II.9.

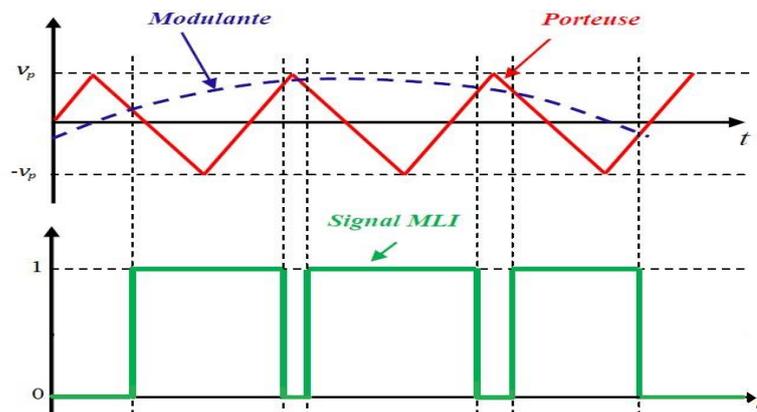


Figure II.9 Principe de la commande MLI sinus-triangle

II.5.7 Modélisation de la charge

L'utilisation de la génératrice asynchrone pour alimenter une charge résistive constitue l'application la plus simple de cette dernière. Ceci étant grâce au fait que les fluctuations de la tension et de la fréquence, si elles ne sont pas excessives, ne posent pas de problèmes pour la charge.

Dans ce qui suit nous allons établir le modèle de la charge résistive triphasée équilibrée dans le référentiel arbitraire. Ce dernier, associé au modèle de la génératrice asynchrone, permet de simuler le débit sur charge résistive.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des principales composantes du système, en particulier la MASRB alimentée par un convertisseur bidirectionnel au niveau du rotor, tandis que le stator est directement connecté à une charge triphasée équilibrée en mode autonome. Les équations décrivant les grandeurs électriques et mécaniques ont permis de développer un modèle

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'éolienne à base d'une machine MAS à rotor bobiné

mathématique simplifié grâce à certaines hypothèses. Ce modèle a été établi dans les repères triphasé et biphasé (dq) via la transformation de Park, facilitant ainsi l'analyse dynamique et la gestion des tensions et courants du système.

Dans le chapitre suivant, nous analyserons les résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne en mode autonome. Cette analyse se concentrera sur la régulation de la tension, l'équilibre production-demande de puissance, et la réponse aux variations de la vitesse du vent, afin d'évaluer l'efficacité du système et d'identifier les pistes d'amélioration.

Chapitre III Analyses
et interprétations des
résultats de simulation
du système autonome
étudié

Chapitre III Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de concevoir un système de contrôle permettant de réguler l'amplitude de la tension générée par un système de production basé sur une MASRB, fonctionnant de manière autonome et isolée du réseau électrique. À partir du modèle de la machine, une régulation de la tension statorique est développée, prenant en compte les variations de la puissance demandée par la charge et de la vitesse de rotation de l'arbre. A la fin de ce chapitre, des simulations sont effectuées pour divers scénarios transitoires afin d'évaluer les performances du système étudié avec la stratégie de contrôle proposée.

III.2 Présentation du système global basé sur la MASRB

Le système de génération étudié est illustré à la figure III.1. Il est composé d'une MASRB entraînée par une turbine éolienne à vitesse variable, contrôlée pour alimenter des charges triphasées en tension. La topologie adoptée permet au système de fonctionner en mode autonome. L'équilibre entre la production et la demande en puissance est l'un des principaux défis des systèmes autonomes. En raison de la nature aléatoire et imprévisible de l'énergie éolienne, il est clair qu'un système basé uniquement sur cette source, sans énergie auxiliaire, ne peut garantir une alimentation ininterrompue des charges connectées. L'objectif de ce chapitre se limite à développer un système capable de contrôler l'amplitude des tensions statoriques.

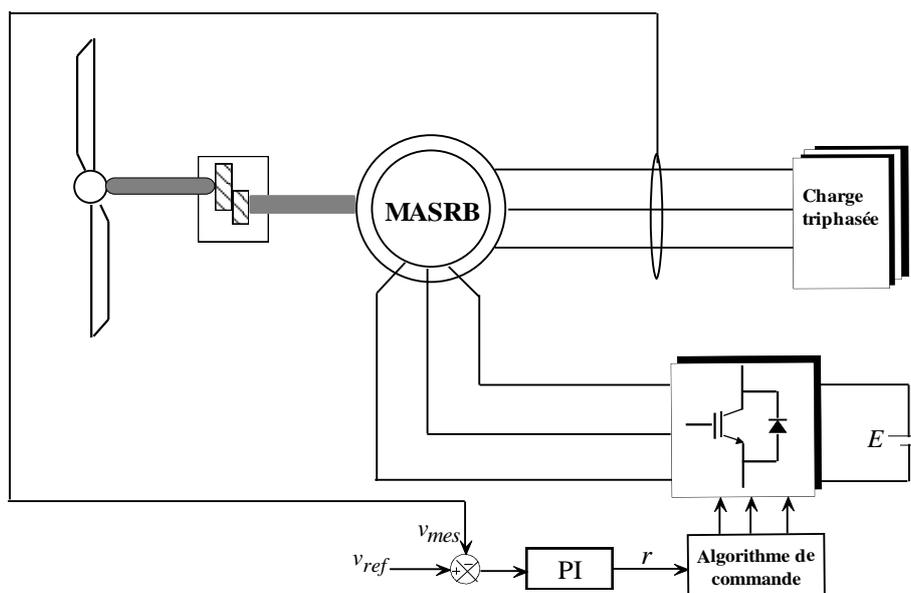


Figure III.1 Système global d'une MASRB en fonctionnement autonome

Chapitre III Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié

III.3 Simulation et analyse des résultats pour le système autonome étudié

III.3.1 Résultats de simulation et interprétations

Les résultats de simulation donnés dans les figures III.2-III.19 représentent l'évolution de quelques grandeurs physiques de la machine à savoir les tensions statoriques et rotoriques, les puissances active et réactive rotoriques en présence et en absence du convertisseur statique pour les deux modes de fonctionnement de la MASRB (hypo-synchrone et hyper-synchrone). Les résultats obtenus en simulation avec convertisseur statique montrent plus des fluctuations au niveau des puissances, de la tension statorique de la machine dues à la technique MLI à cause de la commutation des interrupteurs. Plusieurs tests ont été réalisés pour évaluer les performances dans différentes conditions :

- **Scénario 1** : Test réalisé à une vitesse de vent fixe de 110 rad/s. Ce test a permis d'observer le comportement du système lorsque la génératrice fonctionne en mode hypo-synchrone à cette vitesse de vent constante, c'est-à-dire cette vitesse de rotation est inférieure à la vitesse de synchronisme qui égale à 50π rd/s.
- **Scénario 2** : Test effectué à une vitesse de vent fixe de 205 rad/s. Ce scénario a évalué les performances du système en mode hyper-synchrone, également avec une vitesse de vent constante, c'est-à-dire cette vitesse de rotation est supérieure à la vitesse de synchronisme.
- **Scénario 3** : Test réalisé avec une vitesse de vent variable et une charge constante. Ce test a été mené pour les deux modes de fonctionnement (hyposynchrone et hypersynchrone) afin d'analyser comment le système réagit à des variations de la vitesse du vent tout en maintenant une charge triphasée équilibrée fixe.

Scénario 1 : Test réalisé à vitesse de vent fixe en mode hyposynchrone

Les figures III.2-III.7 représentent l'évolution des grandeurs physiques de la machine à savoir les tensions statoriques et rotoriques, les puissances active et réactive en présence et en absence du convertisseur statique pour mode de fonctionnement de la MASRB hypo-synchrone

Chapitre III Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié

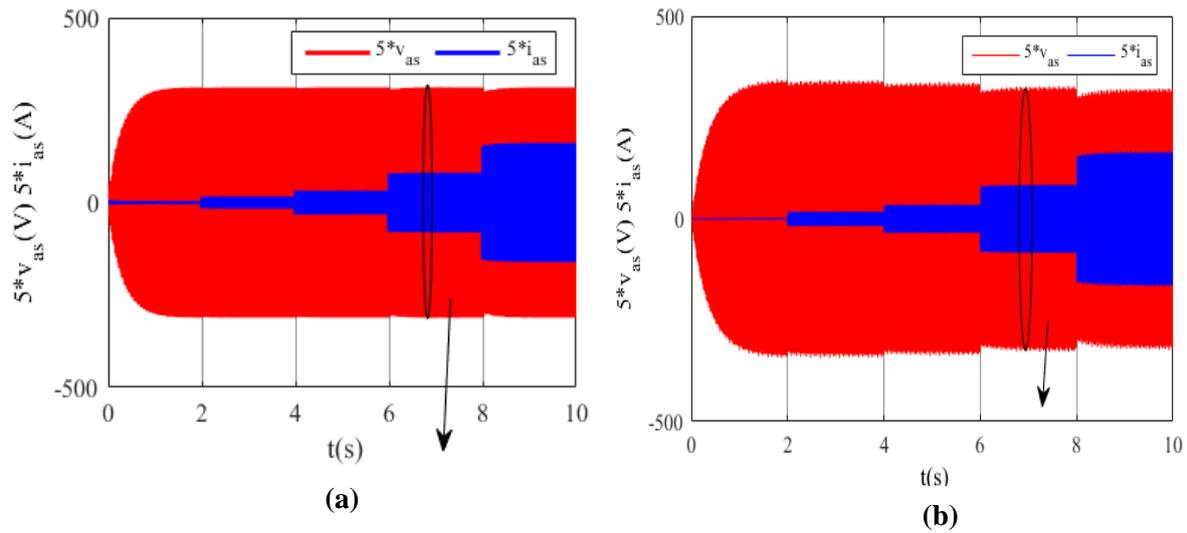


Figure III.2 (a) Allures de la tension et du courant statoriques (alimentation directe) ;
 (b) Allures de la tension et du courant statoriques (avec convertisseur)

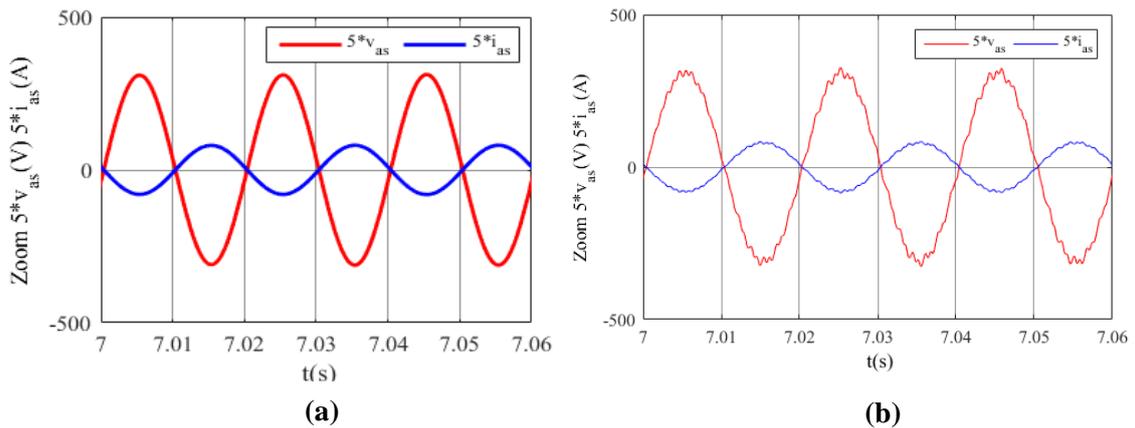


Figure III.3 (a) Zoom sur la tension et le courant statoriques (alimentation directe) ;
 (b) Zoom sur la tension et le courant statoriques (avec convertisseur)

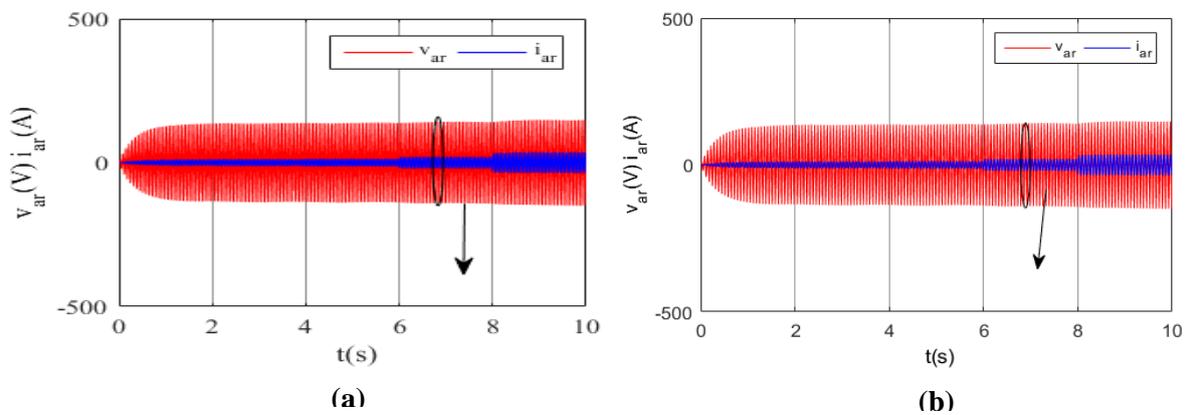


Figure III.4 (a) Allures de la tension et du courant rotoriques (alimentation directe) ;
 (b) Allures de la tension et du courant rotoriques (avec convertisseur)

Chapitre III Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié

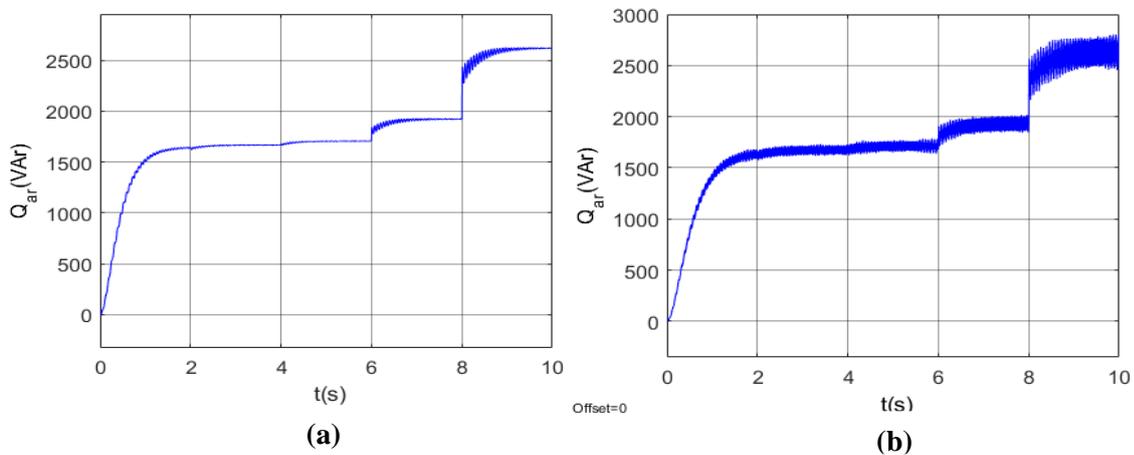
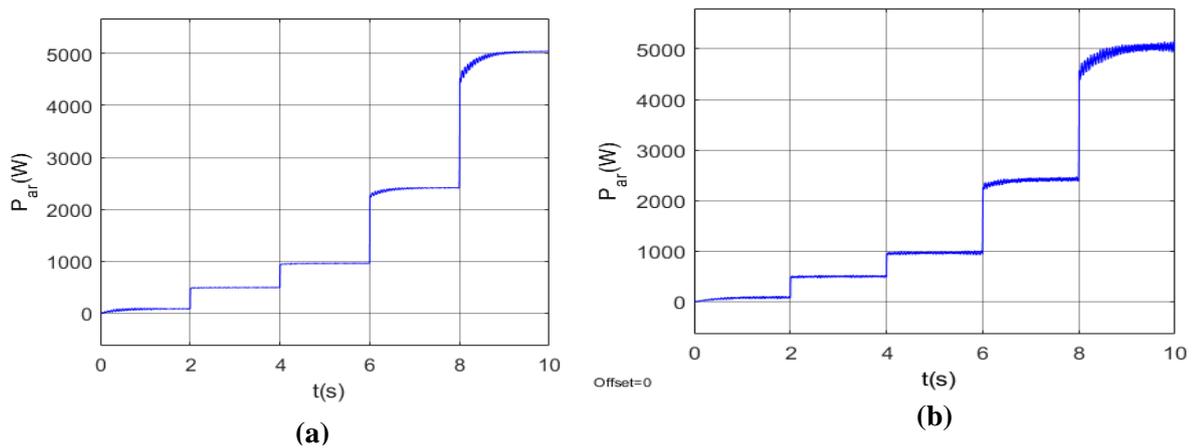
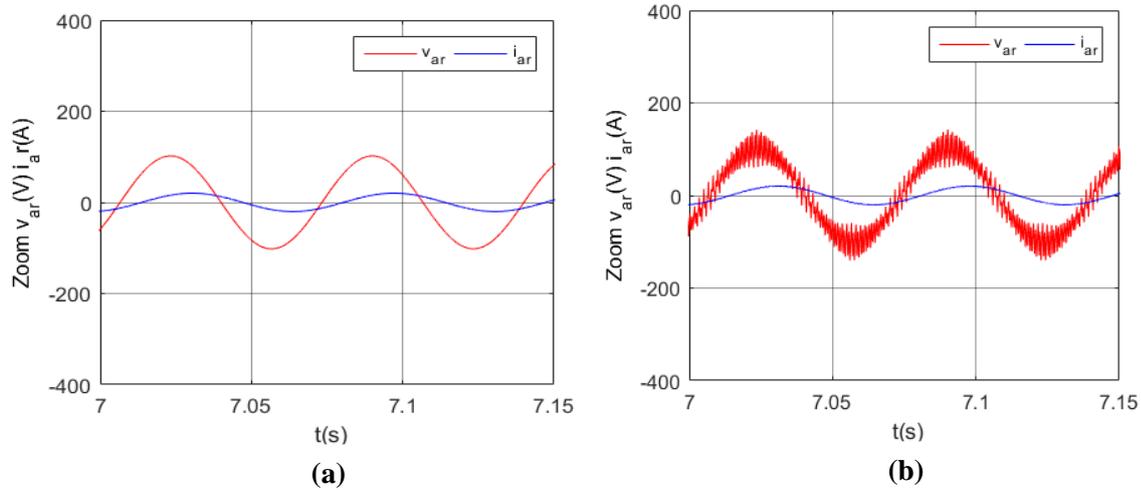


Figure III.7 (a) Allure de la puissance réactive rotorique (alimentation directe) ; (b) Allure de la puissance réactive rotorique (avec convertisseur)

Chapitre III Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié

Scénario 2 : Test réalisé à vitesse de vent fixe en mode hypersynchrone

Les figures III.8-III.13 représentent l'évolution des grandeurs physiques de la machine à savoir les tensions statoriques et rotoriques, les puissances active et réactive rotoriques en présence et en absence du convertisseur statique pour mode de fonctionnement de la MASRB hyper-synchrone

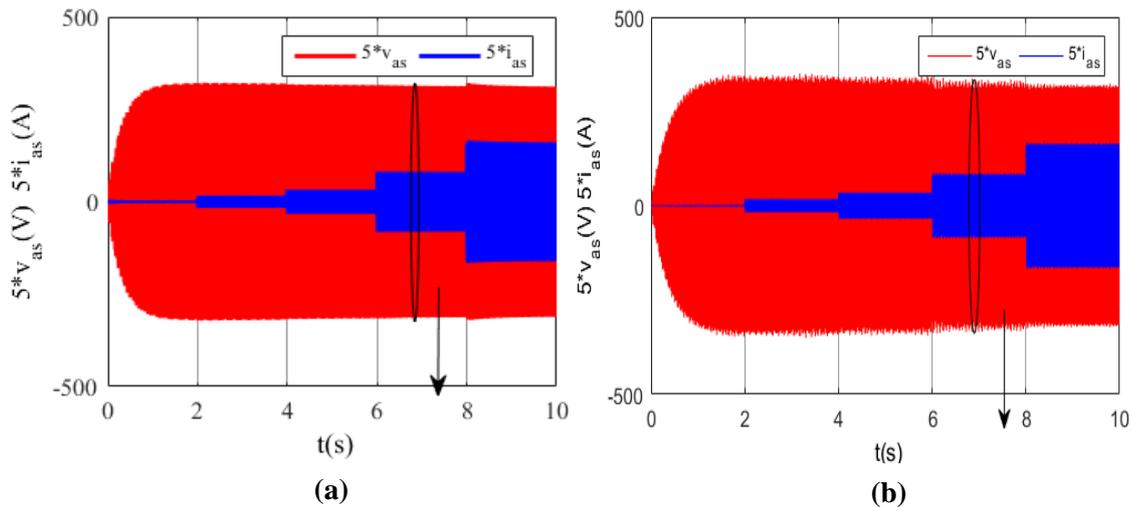


Figure III.8 (a) Allures de la tension et du courant statoriques (alimentation directe) ;
(b) Allures de la tension et du courant statoriques (avec convertisseur)

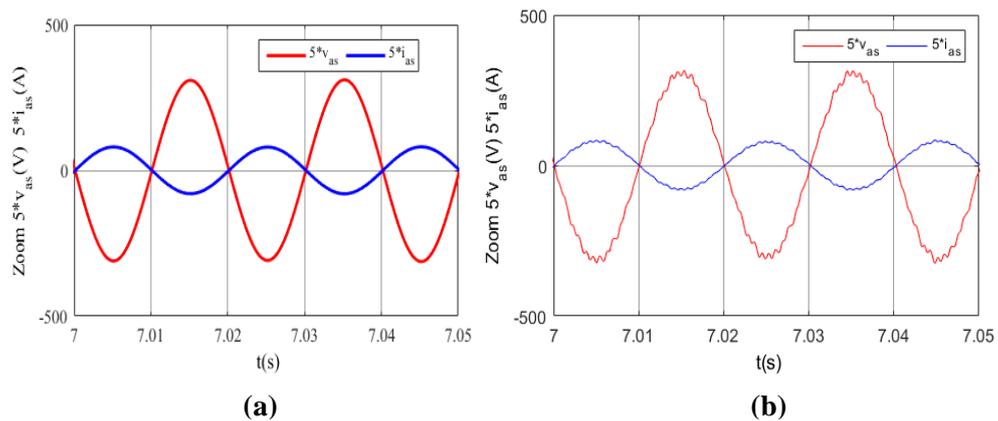


Figure III.9 (a) Zoom sur la tension et le courant statoriques (alimentation directe) ;
(b) Zoom sur la tension et le courant statoriques (avec convertisseur)

Chapitre III Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié

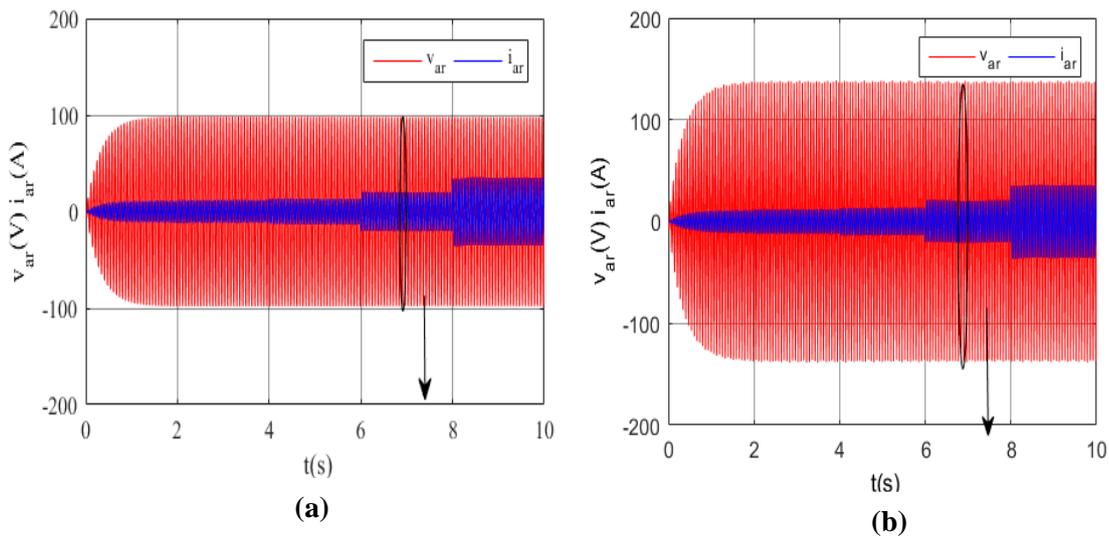


Figure III.10 (a) Allures de la tension et du courant rotoriques (alimentation directe) ;
(b) Allures de la tension et du courant rotoriques (avec convertisseur)

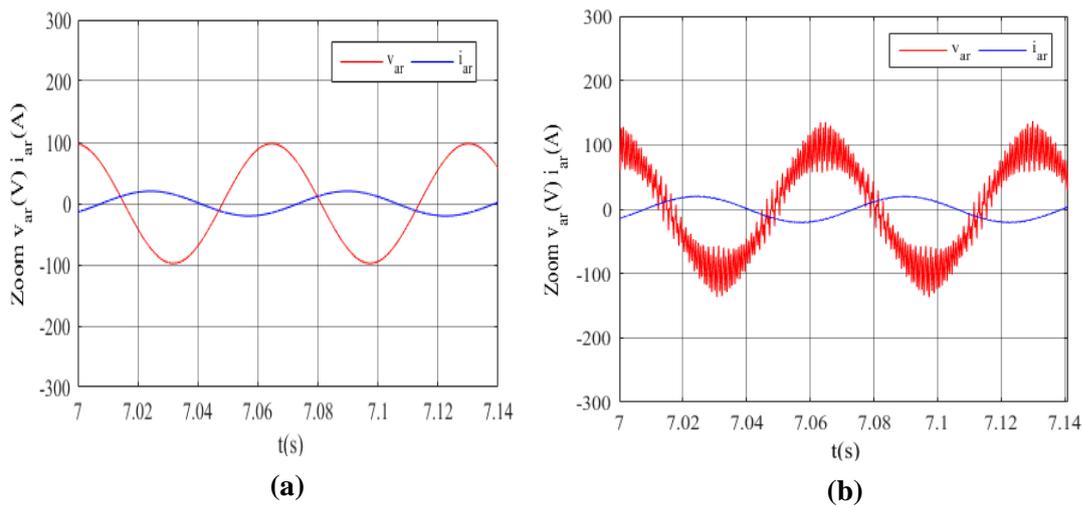


Figure III.11 (a) Zoom sur la tension et le courant rotoriques (alimentation directe) ;
(b) Zoom sur la tension et le courant rotoriques (avec convertisseur)

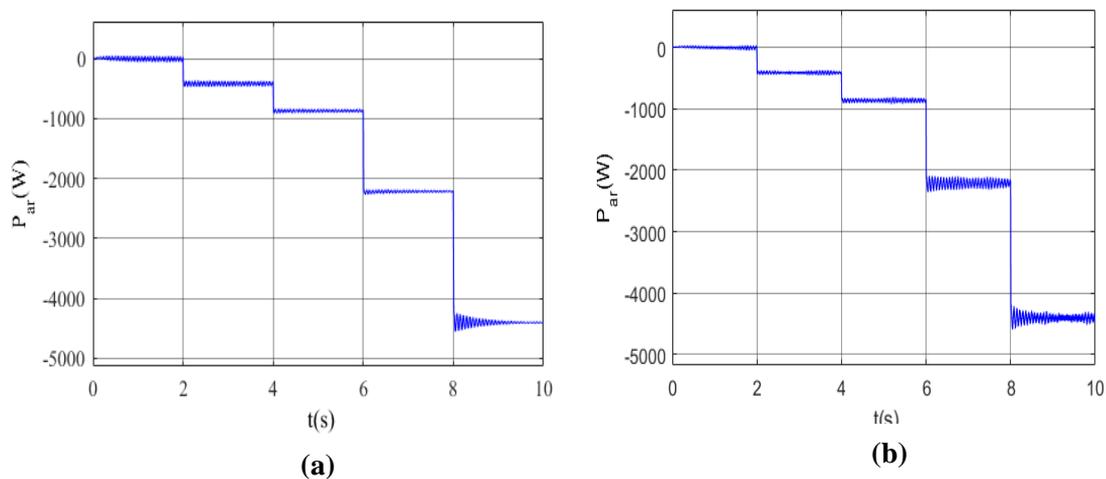


Figure III.12 (a) Allure de la puissance active rotorique (alimentation directe) ;
(b) Allure de la puissance active rotorique (avec convertisseur)

Chapitre III Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié

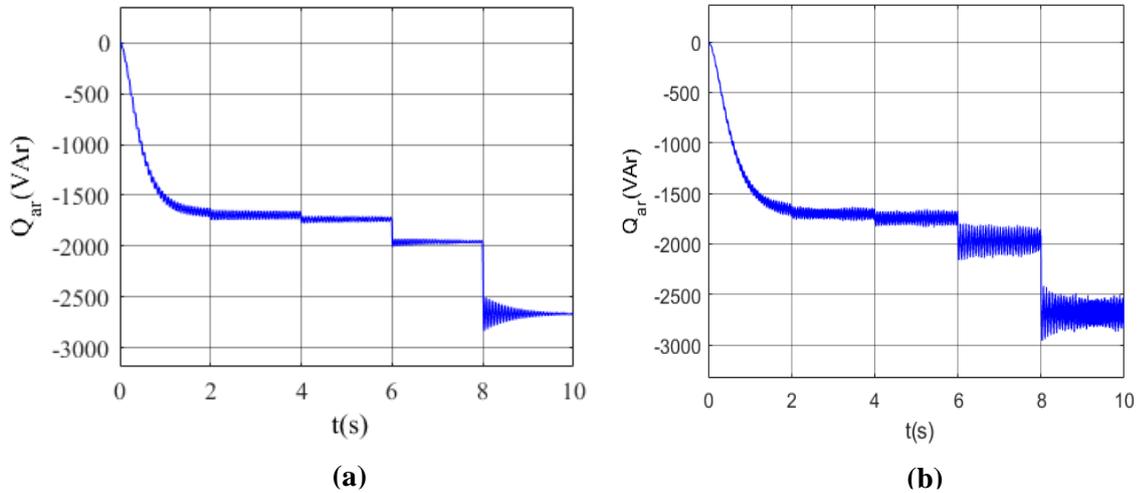


Figure III.13 (a) Allure de la puissance réactive (alimentation directe) ;
 (b) Allure de la puissance réactive (avec convertisseur)

Scénario 3 : Test effectué avec une vitesse de vent variable et une charge constante

Les figures III.14-III.17 illustrent l'évolution des grandeurs physiques de la machine, telles que les tensions statoriques et rotoriques ainsi que les puissances active et réactive, en présence et en absence du convertisseur statique, pour les deux modes de fonctionnement de la MASRB. Les flux de puissance dans le système correspondant aux conditions de test sont présentés sur les figures III.18 et III.19. Il est à noter qu'à tout instant, la puissance active consommée par la charge est égale à la somme des puissances actives du stator et du rotor. Le sens de l'écoulement de la puissance à travers le rotor dépend du mode de fonctionnement du générateur (mode hypo-synchrone ou mode hyper-synchrone). La puissance réactive

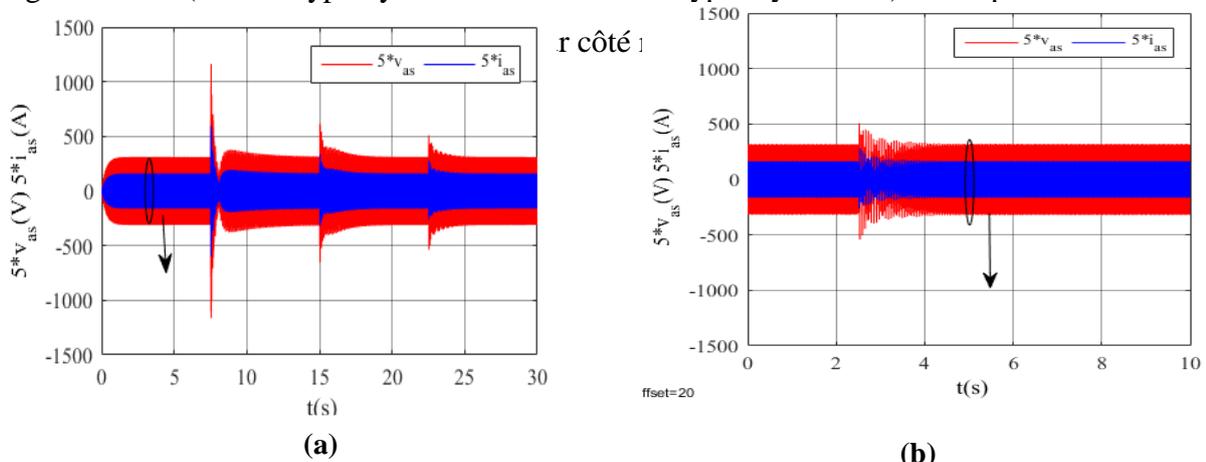


Figure III.14 (a) Allures de la tension et du courant statoriques (alimentation directe) ;
 (b) Allures de la tension et du courant statoriques (avec convertisseur)

Chapitre III Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié

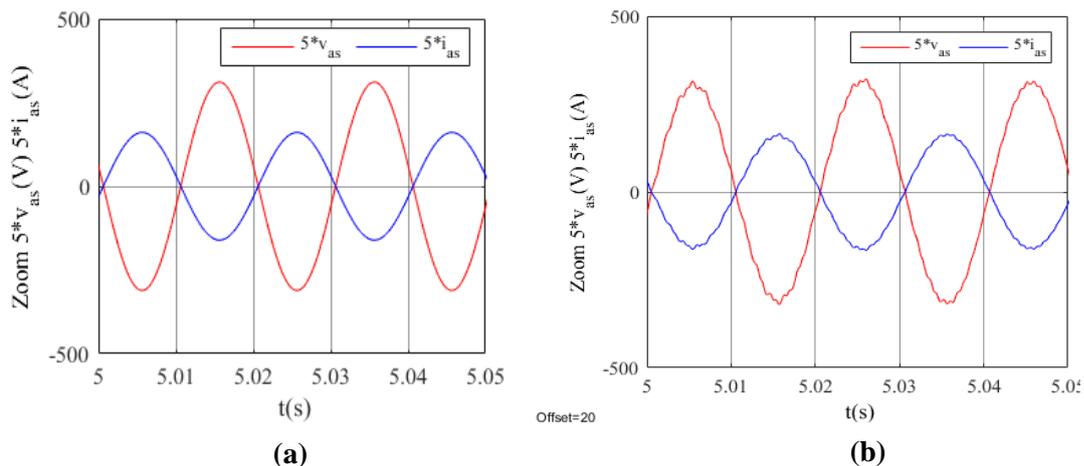


Figure III.15 (a) Zoom sur la tension et le courant statoriques (alimentation directe) ;
 (b) Zoom sur la tension et le courant statoriques (avec convertisseur)

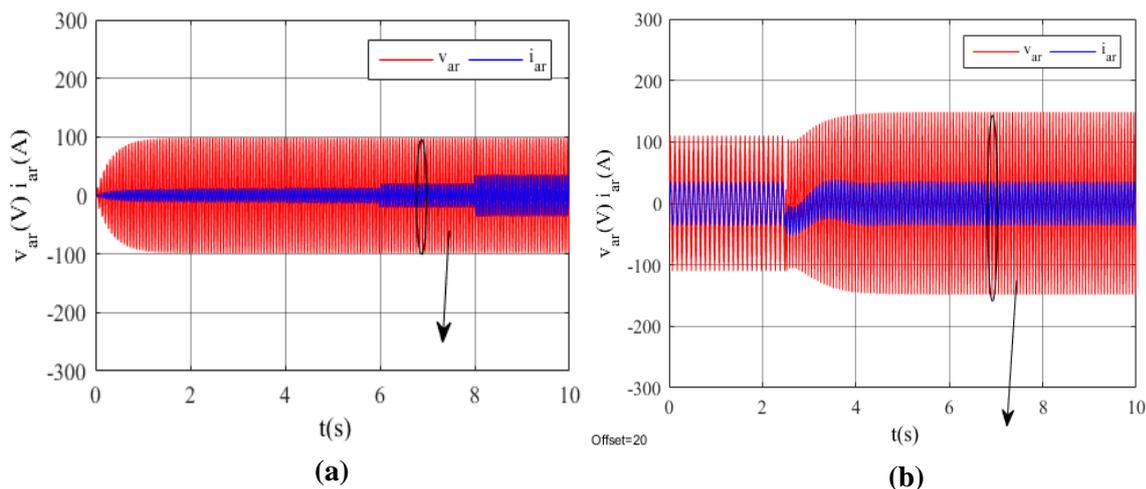


Figure III.16 (a) Allures de la tension et du courant rotoriques (alimentation directe) ;

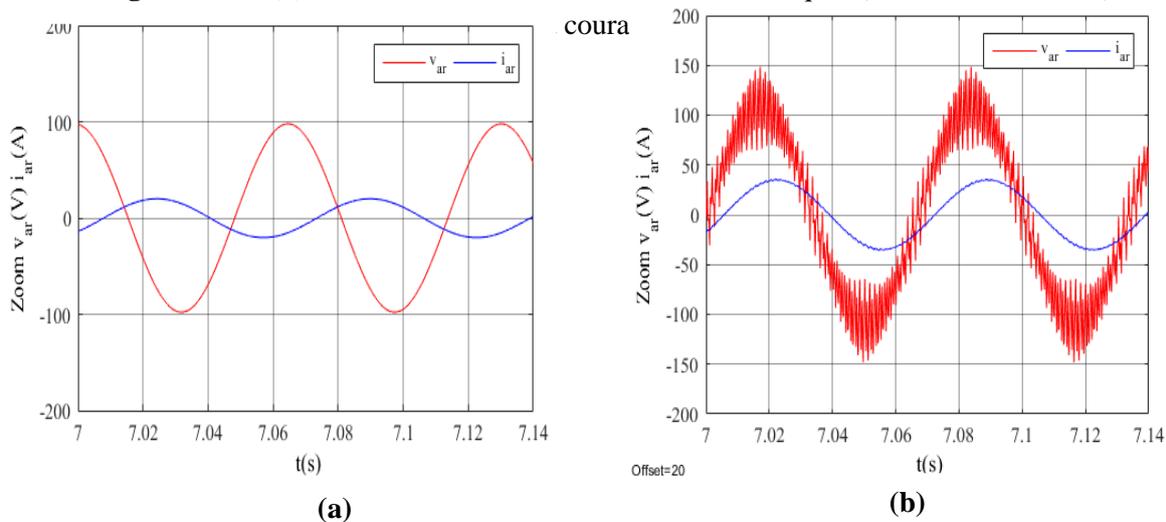


Figure III.17 (a) Zoom sur la tension et le courant rotoriques (alimentation directe) ;
 (b) Zoom sur la tension et le courant rotoriques (avec convertisseur)

Chapitre III Analyses et interprétations des résultats de simulation du système autonome étudié

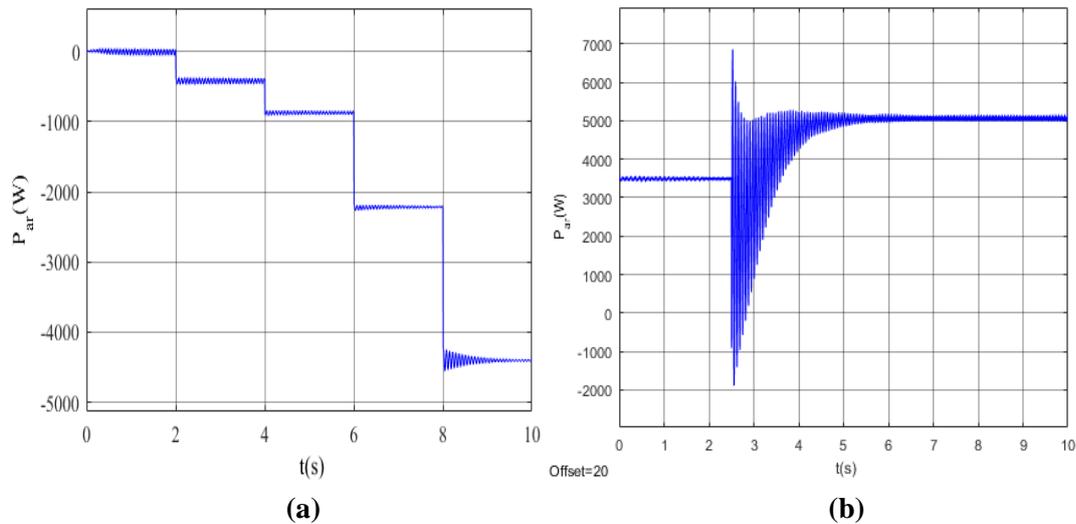


Figure III.18 (a) Allure de la puissance active (alimentation directe) ;
(b) Allure de la puissance active (avec convertisseur)

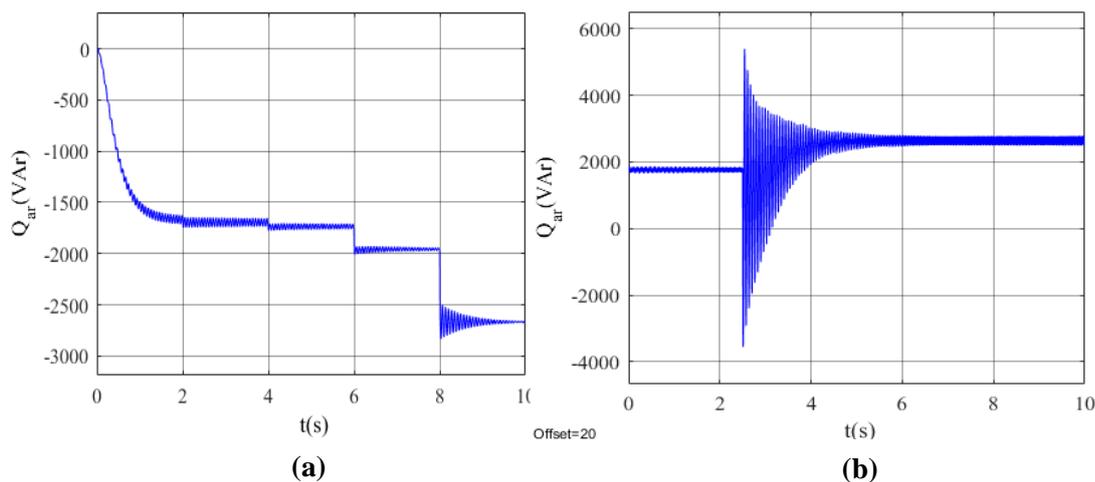


Figure III.19 (a) Allure de la puissance réactive (alimentation directe) ;
(b) Allure de la puissance réactive (avec convertisseur)

II.4 Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à tester sur l'environnement MALAB/Simulink les performances de la commande d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné. Les résultats de simulation ont montré d'une manière générale, la capacité de notre structure à fonctionner à vitesse et/ou à charge variable. On constate une bonne régulation de la tension statorique pour les variations de vitesse mais une certaine sensibilité aux variations de la charge. Toutefois, la régulation permet à cette tension de retrouver rapidement sa valeur référence.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail vise à étudier le comportement de la machine asynchrone à rotor bobiné (MASRB) en mode autonome.

Dans le premier chapitre, on a présenté la description d'une éolienne et les différents types de l'éolienne, puis nous avons présenté quelques systèmes connectés au réseau en fonctionnement à vitesse fixe et à vitesse variable ainsi que quelques structures les plus répondues puis les chaînes exploitées dans stations isolées et autonomes.

Dans le deuxième chapitre, une modélisation des différentes parties du système étudié a été réalisée. Le modèle du générateur est basé sur une MASRB, alimentée au niveau de son rotor par un convertisseur de puissance bidirectionnel, tandis que le stator est directement connecté à une charge triphasée équilibrée en mode autonome. La mise en équation des différentes grandeurs de la machine a permis d'établir un modèle mathématique équivalent, dont la complexité a été réduite en s'appuyant sur certaines hypothèses simplificatrices. Ce chapitre a permis de formuler les équations de la génératrice dans le repère triphasé, puis dans le référentiel biphasé tournant d'axe (dq) à l'aide de la transformation de Park.

Dans le troisième chapitre, une technique de commande basée sur des régulateurs PI a été utilisée, en prenant comme grandeurs de commande les tensions rotoriques pour réguler les tensions statoriques. Les résultats obtenus ont été analysés en fonction de l'évolution du système lors de variations de la charge et de la vitesse d'entraînement. Les simulations ont montré que la stratégie de contrôle proposée est capable de compenser les perturbations extérieures, telles que les variations de charge et de vitesse d'entraînement, même sur une large plage de transitions.

Pour la continuité de ce travail, on peut dresser les perspectives de recherche associées au thème abordé dans ce mémoire :

- Dans le domaine de la modélisation, on peut ajouter la modélisation de la turbine et la modélisation de la batterie.
- Pour la commande, on envisage l'utilisation de régulateurs avancés tels que les régulateurs prédictifs (MPC) ou adaptatifs, à la place des régulateurs classiques PI.

Conclusion générale

- Simulation du système global pour alimenter des charges triphasées à effet inductif et à effet capacitif et des charges non équilibrées et/ou non linéaires;
- Validation des résultats obtenus par les essais pratiques.

Références Bibliographiques

[1] H. CAMBLONG, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éoliennes dans la génération de l'électricité par les aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de l'école d'arts et métiers, Bordeaux, 2003.

[2] G. W. E. C. GWEC, Global wind report 2023, 2023.

[3] M. LOPEZ « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de doctorat de l'université de Paris-sud 11, 0000.

[4] A. MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de l'école polytechnique de Toulouse, 2005.

[5] N. CHERFIA, « Etude d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri de Constantine, 2018.

[6] A. TENINGE, « Participation aux services système de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire ». Thèse de l'institut polytechnique de Grenoble, 2009.

[7] M. TAZIL et al. Three-phase doubly fed induction generators: an overview. IET Journal on Electric Power Applications 2010;

[8] A. YAHDYOU, « Commande hybride par mode glissant d'ordre 2 d'un système éolien à double rotor », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, p. 188, 2017.

[9] F. ABDOUNE « Amélioration des performances des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à double alimentation » Thèse de doctorat, Université A.MIRA. Bejaia, 2016

[10] S.DRID, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction, double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : Théorie et Expérimentation », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2005.

[11] Y. DJERIRI, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle »; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel- Abbès, Algérie, 2015.

[12] I. VECHIU « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », thèse de doctorat, 2007.

[13] F.BAGHDADI, « Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables », mémoire de magister , 2011.

[14] S. CHEKKAL, « Intégration des génératrices asynchrones à double étoiles dans un système éolien », Thèse de doctorat, Université A.MIRA. Bejaia, 2015

[15] BOUSSAID RAFIK MORAD MOHAMMED ABDELHALIM, «Commandes non linéaires d'une machine asynchrone double alimentation », PFE en master , Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen). 20 /06/2016.

[16] B. Benyachou, F.Ait Ouhrouch, K. Gueraoui, B. Bahrar, «Modélisation sousMATLAB/Simulink d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)», 13ème congrès de la mécanique à Meknès - Maroc, 2017.

[17] Université de béjaia Etude d'une éolienne en fonctionnement autonome à base d'une GADA , Mémoire de Master présenter par Mr : MESSAOUDI Fares et OUALI Abdelatif en 2020.

[18] Mr. Allam Mohhamed, «Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable», thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes – Sidi Bel Abbes, 2017.

[19] N.Bakouri « Etude et Commande des Générateurs Pour Réseaux Autonome de Bord d'Avion » Mémoire de Magister, Université Béjaïa, 2013.

[20] Université de BEJAIA Application d'une stratégie de contrôle avancée à la génératrice asynchrone à cage d'écureuil Mémoire de Master présenté par MOUNIR ZEGGANE et YAYA SAAD en 2022.

Annexe

Annexe

Tension nominal: $V_s=220$ [V];

Puissance nominale : $P = 15$ [KW] ;

Fréquence d'alimentation : $f_s = 50$ Hz];

Résistances statorique et rotorique ramenée au stator :

$r_s = 0.402$ [Ohm] ; $r_r = 0.196$ [Ohm] ;

Inductances de fuite statorique et rotorique ramenée au stator :

$l_{fs} = 0.0023$ [H];

$l_{fr} = 0.0032$ [H];

Inductances propres statorique et rotorique ramenée au stator :

$l_s = 0.0605$ [H]; $l_r = 0.061$ [H]

Inductance mutuelle : $l_m = 0.0582$ [H];

Inductances cycliques statorique et rotorique ramenée au stator :

$L_s = 0.0896$ [H]; $L_r = 0.905$ [H];

Inductance mutuelle cyclique : $L_m = 0.0873$ [H];

Nombre de pair de pôle : $P = 2$;

Nombre de spires statoriques : $N_s = 112$;

Moment d'inertie : $J = 0.2$ [Kg.m²];

Coefficient de frottement : $f = 0.0005$ [N.m.s];