

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université Abdelhamid Ben Badis

Mostaganem



Faculté de génie électrique
Département d'électrotechnique
Mémoire pour l'obtention du diplôme de
Magister en électrotechnique
Option : Energie électrique et développement durable

Présentée par :
GRINE MOURAD

Thème

Etude d'éolienne à vitesse variable basée
sur la machine asynchrone à double
alimentation (MADA)

Soutenue le : 12/12 /2011, devant le jury :

✚ Mme. M.MIMI	Présidente	Professeur
✚ Mr. A.AHAMADOUCHE	Rapporteur	M.C.A
✚ Mr. B.BEKKOUCHE	Examineur	M.C.A
✚ Mr. A.BENTOUNES	Examineur	M.C.A

Remerciement

Tout d'abord merci au bon DIEU le tout puissant, de m'avoir donné la force, la patience et la volonté pour réaliser ce travail dans des meilleurs circonstances et en bon état.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur BEKKOUCHE le responsable d'option et à mon encadreur monsieur AHAMADOUCHE et madame GHOMRI

Mes remerciements aux enseignants de la faculté de génie électrique de l'université Abdelhamid Ibn Badis

« Mostaganem »

En particulier l'enseignant BENTOUMI.

Mes remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Sans oublier mes collègues dans le domaine de la recherche et durant les années d'étude, je tiens à les remercier vivement.

Enfin je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la rédaction de ce mémoire.

Dédicaces

Avant tout à mes chers parents qui m'ont soutenu pendant toute la durée de ces longues études, « que Dieu me le protègent »

A mes chers frères et sœurs.

A toute la famille GRINE.

A mes collègues de l'option énergie électrique et développement durable.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire.

Aux gens que j'aime, et aux gens qui m'aiment et m'estiment.

A tous les enseignants et les éducateurs qui ont contribué à ma formation durant tout le parcours de mes études jusqu'à ce jour.

...je dédie ce modeste travail

G.Mourad

Chapitre I

Figure		Page
Figure I-1	capacité totale de puissance installée au monde(MW)	4
Figure I-2	Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Figure I-3	Installation d'un parc éolien	6
Figure I-4	Taille des hélices en mètre et puissance en KW	7
Figure I-5	différentes parties d'une éolienne NORDEX N60 (1,3MW)	8
Figure I-6	Éoliennes à axe vertical de type savonius	10
Figure I-7	Éolienne à axe vertical de type darrius	10
Figure I-8	Éolienne à axe horizontal	11
Figure I-9	Petite éolienne sous le vent de 22KW avec pylône léger haubané	12
Figure I-10	Éolienne face au vent avec pylône cylindrique de grande section	13
Figure I-11	Pales d'une éolienne avec système de freinage en bout	14
Figure I-12	Théorie de Betz	15
Figure I-13	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	18
Figure I-14	Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne	17
Figure I-15	Bilan des forces sur une pale	17
Figure I-16	Flux d'air sur un profil de pale « stall »	18
Figure I-17	Variation de l'angle de calage d'une pale	19
Figure I-18	Courbe typique de régulation	19
Figure I-19	Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple	20
Figure I-20	Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable	21
Figure I-21	Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur-onduleur	22
Figure I-22	Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone « brushless »	23
Figure I-23	Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau	23
Figure I-24	Machine asynchrone à rotor bobiné	24
Figure I-25	MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	24
Figure I-26	MADA, structure Kramer	25
Figure I-27	Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur	25
Figure I-28	Structure de sherbius avec convertisseur MLI	26

Chapitre II

Figure		Page
Figure II-1	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	29
Figure II-2	Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné	31
Figure II-3	Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor	31
Figure II-4	Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor	32
Figure II-5	Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	34
Figure II-6	Caractéristique de production d'énergie optimale de la MADA et de la machine à cage	35
Figure II-7	MADA commandée par un seul convertisseur alimentant le rotor	36
Figure II-8	MADA commandée par deux onduleurs alimentés à travers deux redresseurs	37
Figure II-9	Commande de la MADA par deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun	37
Figure II-10	Représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation	40
Figure II-11	Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA	43

Chapitre III

Figure		Page
Figure III-1	Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA	49
Figure III-2	Représentation du redresseur triphasé à diodes	50
Figure III-3	Représentation de la tension de sortie du redresseur	51
Figure III-4	Représentation du filtre passe-bas	51
Figure III-5	Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une MADA	52
Figure III-6	Principe de commande en MLI sinus-triangulaire	54

Chapitre IV

Figure		Page
Figure IV-1	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique »	55
Figure IV-2	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique »	56
Figure IV-3	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique »	56

Figure IV-4	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive »	57
Figure IV-5	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique pour $V=5\text{m/s}$ »	58
Figure IV-6	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour $V=5\text{m/s}$ »	59
Figure IV-7	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour $V=5\text{m/s}$ »	59
Figure IV-8	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance statorique active et réactive pour $V=5\text{m/s}$ »	60
Figure IV-9	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique pour $V=10\text{m/s}$ »	61
Figure IV-10	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour $V=10\text{m/s}$ »	61
Figure IV-11	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour $V=10\text{m/s}$ »	62
Figure IV-12	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance statorique active et réactive pour $V=10\text{m/s}$ »	63
Figure IV-13	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique pour $V=20\text{m/s}$ »	63
Figure IV-14	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour $V=20\text{m/s}$ »	64
Figure IV-15	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour $V=20\text{m/s}$ »	64
Figure IV-16	Résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance statorique active et réactive pour $V=20\text{m/s}$ »	65

Notations symbolique

Symbole	Signification	Unités
\vec{F}	Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable	/
V_1, V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne	m/s
ρ	Densité de l'air $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$	kg.m^{-3}
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne	m^2
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s	Kg /s
P_m	Puissance extraite par le rotor éolien	W
P_{mt}	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé	W
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne	/
λ	Vitesse relative de l'éolienne	/
Ω_1, Ω_2	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur	rad/s
Ω	Vitesse de rotation de la génératrice	rad/s
P_{mg}	Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice	W
\vec{V}	Vecteur vitesse du vent	m/s
β	Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal	rad
i	Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal	rad
\vec{V}_{rot}	Composante de la vitesse du vent due à la rotation de la turbine	m/s
\vec{V}_{res}	Résultante des vecteurs \vec{V} et \vec{V}_{rot}	m/s
\vec{F}_{ax}	Vecteur force représentant la poussée axiale sur une pale	/
\vec{F}_{rot}	Vecteur force représentant la poussée en direction de la rotation sur la pale	/
\vec{F}_{res}	Résultante de \vec{F}_{ax} et \vec{F}_{rot}	/
g	Glissement d'une machine asynchrone	/
R	Rayon d'aérogénérateur	m
ω_s	Vitesse angulaire de rotation du champ tournant	rad/s
ω_r	Vitesse angulaire de rotation du rotor	rad/s
ω_{gl}	Pulsation de glissement	rad/s
f_{ro}	Fréquence rotorique	Hz
P_s	puissance transitant par le stator	W
P_r	puissance transitant par le rotor	W
P_m	puissance mécanique	W
u_{abc}	Tensions instantanées des phases statoriques	V

\mathbf{u}_{ABC}	Tensions instantanées des phases rotoriques	V
R_s	résistance d'une phase statorique	Ω
R_r	résistance d'une phase rotorique	Ω
\mathbf{i}_{abc}	Courants instantanés des phases statoriques	A
\mathbf{i}_{ABC}	Courants instantanés des phases rotoriques	A
Φ_{abc}	flux instantanés des phases statoriques	Wb
Φ_{ABC}	flux instantanés des phases rotoriques	Wb
L_s, L_r	Inductances cycliques, rotorique et statorique respectivement	H
L_{sr}	inductances mutuelles entre le stator et le rotor	H
Ω_r	vitesse angulaire mécanique du rotor	rad/s
f_r	coefficient de frottement	N.m.s/rad
C_{em}	couple électromagnétique	N.m
C_r	couple résistant	N.m
J	moment d'inertie du rotor de la machine	Kg.m ²
θ	angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a	Rad
θ_r	angle entre l'axe rotorique A, et l'axe de Park direct d	Rad
θ_s	angle entre l'axe statorique a, et l'axe de Park direct d	Rad
ω_a	vitesse angulaire du système d'axes (d, q)	Rad/s
σ	coefficient de dispersion de blondel	/
Φ_{dqor}	Composantes de flux rotorique dans le repère de Park	Wb
Φ_{dqos}	Composantes de flux statorique dans le repère de Park	Wb
M	Inductance cyclique mutuelle	H
P_{em}	Puissance électromagnétique	W
P	Nombre de paires de pôles	W
$\mathbf{u}_d(t)$	Tension redressée	V
\mathbf{i}_{dqor}	Composantes du courant rotorique dans le repère de Park	A
\mathbf{i}_{dqos}	Composantes du courant statorique dans le repère de Park	A
\mathbf{u}_{dqor}	Composantes de tension rotorique dans le repère de Park	V
\mathbf{u}_{dqos}	Composantes de tension statorique dans le repère de Park	V
V_{DC}	Tension aux bornes de la capacité du filtre	V
V_{red}	Tension redressé	V
f_c	fréquence de coupure	Hz
$\mathbf{u}_f(t)$	Tension filtrée	V

Liste des abréviations

Acronyme	Signification
MADA	Machine asynchrone a double alimentation
Fmm	Force magnétomotrice
MLI	modulation de largeur d'impulsion

Résumé

Le travail effectué dans cette thèse représente une étude générale sur la production d'énergie électrique par les éoliennes à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Les concepts fondamentaux de la chaîne de production de l'énergie électrique et les différentes associations machines électriques-convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne.

Dans notre étude on prend la machine asynchrone a double alimentation (MADA) ou elle est alimentée par un convertisseur au rotor alors que le stator est lié au réseau (fonctionnement en générateur pour une application du type éolienne) lié avec la modélisation d'alimentation commande de la MADA ,avec aussi la réalisation d'un schéma global de notre chaîne de conversion sous MATLAB ou on sorte avec des résultats de simulations suivant la vitesse de vent (pour avoir la vitesse de vent optimal pour le fonctionnement). On sorte à la fin avec des conclusions sur cette conversion.

ملخص

الأعمال المنجزة في هذه الأطروحة يمثل دراسة شاملة عن إنتاج الكهرباء بواسطة توربينات الرياح مع سرعة متغير يستند على الجهاز غير المتزامن المزدوج تغذية (MADA). يمكن أن يقترن المفاهيم الأساسية من خط إنتاج الطاقة الكهربائية ومختلف الجمعيات المحولات الكهربائية الآلات لتوربين الرياح. في دراستنا نأخذ الجهاز متزامنة المزدوج تغذية (MADA) أو يتغذى من قبل محول إلى الدوار أثناء توصيل الموالي لشبكة (يعمل كمولد لتطبيق نوع الرياح) المرتبطة النمذجة السيطرة على السلطة من مدى، وأيضا مع تحقيق سلسلة عالمية لتحويل لدينا في MATLAB أو نحو ذلك مع نتائج المحاكاة وفقا لسرعة الرياح (لسرعة الرياح لتشغيل الأمثل). لذلك نحن مع نهاية استنتاجات بشأن هذا التحويل.

Abstract

The work done in this thesis represents a comprehensive study on the production of electricity by wind turbines with variable speed based on the double-fed asynchronous machine (DFIG). The fundamental concepts of the production line of electric energy and the various associations-electric machines converters can be coupled to a wind turbine.

In our study we take the double-fed asynchronous machine (DFIG) or it is fed by a converter to the rotor while the stator is connected to the network (functioning as a generator for an application type wind) associated with the modeling power control of DFIG, also with the realization of a global chain of our conversion is in MATLAB or so with the results of simulations according to the wind speed (for wind speed for optimal operation). Therefore, we end with conclusions on this conversion.

Tables des matières

Introduction générale	1
-----------------------	---

Chapitre I : généralité sur l'énergie éolienne

1.1	Introduction	3
1.2	Développement de l'énergie éolienne	3
1.3	La situation actuelle d'énergie éolienne dans l'Afrique et Algérie	4
1.4	Définition d'un système éolien	4
1.5	Descriptif et qualité de l'énergie éolienne	5
1.5.1	Définition de l'énergie éolienne	5
1.5.2	Emplacement des parcs éoliens	5
1.5.3	Taille des aérogénérateurs	6
1.5.4	Principaux composants d'une éolienne	7
1.6	Conception mécanique des éoliennes	9
1.6.1	Éolienne à axe vertical	9
1.6.1.1	Les éoliennes à axe vertical de type Savonius	9
1.6.1.2	Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus	10
1.6.1.3	Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical	11
1.6.2	Éolienne à axe horizontal	11
1.6.2.1	Avantage	12
1.6.2.2	Éolienne sous le vent	12
1.6.2.3	Éolienne face au vent	13
1.6.2.4	Régulation de la vitesse du rotor	13
1.6.2.5	Sécurité par grand vent	13
1.7	Énergie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique	14
1.7.1	Loi de Betz	14
1.7.2	Production d'énergie mécanique	16
1.8	Stratégies de fonctionnement d'une éolienne	17
1.8.1	Bilan des forces sur une pale	17
1.8.2	Système de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	18
1.8.2.1	Systèmes à décrochage aérodynamique « stall »	18
1.8.2.2	Systèmes d'orientation des pales « pitch »	19
1.8.3	Production optimale d'énergie	20
1.9	État de l'art sur la conversion électromécanique	21
1.9.1	Système utilisant la machine synchrone	21
1.9.2	Système utilisant la machine asynchrone	21
1.9.2.1	Machine asynchrone à cage d'écureuil	21
1.9.2.2	Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance	22
1.9.2.3	Machine asynchrone à double alimentation type « brushless »	22
1.9.2.4	Machine asynchrone à double alimentation type « rotor bobiné »	23
1.9.2.4.1	Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	24
1.9.2.4.2	Machine asynchrone à double alimentation –structure de Kramer	24

1.9.2.4.3	Machine asynchrone à double alimentation –structure de Scherbius avec cyclo convertisseur	25
1.9.2.4.4	Machine asynchrone à double alimentation –structure de Scherbius avec convertisseur MLI	26
1.10	Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne	26
1.11	Avantages et inconvénient d'éolienne	27
1.11.1	Avantage	27
1.11.2	Inconvénients	28
1.12	Conclusion	28

Chapitre II : Étude et modélisation de la MADA

II.1	Introduction	29
II.2	Présentation de la machine asynchrone à double alimentation	29
II.3	Classification des machines à double alimentation	30
II.3.1	Machine à double alimentation à rotor bobiné	31
II.3.2	Machine à double alimentation en cascade	31
II.3.3	Machine à double alimentation cascadée à un repère	31
II.3.4	Machine à double alimentation sans balais	32
II.3.5	Machine à double alimentation à reluctance variable	32
II.3.6	Machine à double alimentation TANDEM	32
II.4	Comparaison entre les différentes variantes de la machine à double alimentation	32
II.5	Principe de fonctionnement de la MADA	33
II.6	Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA	34
II.7	Les Différentes stratégies de commande de la MADA	36
II.7.1	Commande de la MADA par un seul onduleur	36
II.7.2	Commande de la MADA par deux onduleurs	36
II.7.3	Commande de la MADA par un redresseur alimentant deux onduleurs en parallèle	37
II.8	Avantages et inconvénients de la MADA	37
II.8.1	Avantages de la MADA	38
II.8.2	Inconvénients de la MADA	38
II.9	Domaines d'application de la MADA	39
II.10	Modélisation de la MADA	39
II.10.1	Modèle effectif de la MADA	40
II.10.2	Équations électrique de la MADA	40
II.10.3	Application de la transformation de Park à la MADA	43
II.10.4	Mise en équation de la MADA dans le repère de Park	44
II.10.4.1	Équations des tensions	44
II.10.4.2	Équations des flux	45
II.10.4.3	Choix du référentiel	46
II.10.4.4	Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park	47
II.10.5	Modèle de la MADA dans le repère de Park sous forme d'état	47
II.11	Conclusion	47

Chapitre III : modélisation d'alimentation de la MADA

III.1	Introduction	49
III.2	La chaîne de conversion	49
III.2.1	Modélisation du redresseur triphasé à diodes	50
III.2.2	Modélisation du filtre	51
III.2.3	Modélisation de l'onduleur triphasé	52
III.2.3.1	Modulation de largeur d'impulsion(MLI)	53
III.3	Conclusion	54

Chapitre IV : synoptique de simulateur éolien-MADA

IV.1	Introduction	55
	Présentation globale de la chaîne de conversion de l'éolienne basée sur la	
IV.2	MADA sur MATLAB	55
IV.2.1	Résultats de simulation pour une vitesse de vent 5 m/s	58
IV.2.2	Résultats de simulation pour une vitesse de vent 10 m/s	61
IV.2.3	Résultats de simulation pour une vitesse de vent 20 m/s	63
IV.3	conclusion	66
	Conclusion générale	67
	Bibliographie	
	Annexe	

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est au cœur de notre société moderne qui serait bien en peine si elle devait s'en passer. Sa facilité de transport et surtout sa transformation en une autre forme d'énergie en font un élément désormais indispensable [1].

En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas l'électricité que ce soit pour faire de l'éclairage, du chauffage, des mouvements de rotation ou translation, de la transmission de signaux, de l'imagerie médicale et bien d'autres choses encore...la liste est infinie. C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable.

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voire amplifier, cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques [S1].

D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente.

Pour subvenir au besoin en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y'a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergies.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur une des énergies renouvelables en développement en ce moment qui est l'énergie éolienne qui occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau ou elle est injectée. [2]

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent.

De plus, si l'on arrive à faire en sorte que les éoliennes puissent fournir des services systèmes au réseau, tels que, la fourniture de puissance réactive pour la correction du facteur de puissance et l'amélioration de la qualité de l'énergie par le filtrage des harmoniques de courant alors son insertion dans les réseaux sera sûrement plus simple.

C'est donc dans ce cadre que nous allons développer notre étude sur un système éolien à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le premier chapitre nous allons présenter des rappels sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par un état

de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types des génératrices utilisés et les convertisseurs qui leur sont associé.

Le deuxième chapitre présente une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande, sa modélisation et ses inconvénients et ses avantages.

Le troisième chapitre présent une modélisation de l'alimentation générale de notre système quand doit l'étudier suivant la modélisation de redresseur, le filtre LC et l'onduleur.

Le dernier chapitre comprend un synoptique général de notre conversion éolienne-MADA sous MATLAB avec les résultats de simulation suivant la variation de vitesse de vent dans trois repères de vent (faible, moyen, fort). A la fin de ce chapitre on a terminé par une interprétation des résultats de la simulation.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie

Éolienne

1. Introduction :

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. [3], [S1]

L'autre argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en énergies. Dans le courant de 21ème siècle, le paysage énergétique va radicalement changer car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître, de nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour « tenter » de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale. [S1], [6]

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables parmi ces ressources on base sur l'énergie éolienne qui s'intéresse sur notre thème étudier ou son caractéristiques mécaniques, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. La encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettent de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes. [5]

L'énergie éolienne pour quoi faire ?

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel. [3]

Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait :

- Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.
- Pour alimenter l'éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éolienne de quelques mètres de diamètres sont choses courantes.
- Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5MW.

2. Développement de l'énergie éolienne :

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier. [3]

Suivant la **Figure I-1** qui montre la capacité puissance totale installé (MW) dans le monde durant (2001-2010) on voit que en fin 2010 on a 203GW d'éolienne installé dans le monde qui correspond à la croissance des investissement dans les éoliens a été de 33% par an ou on trouve cette croissance plus investisseur dans l'Europe plus que les autres pays.[S3]

Cette croissance est principalement due à deux raisons :

- ✓ Produire une énergie propre
- ✓ Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.



Figure I-1 : capacité totale de puissance installée au monde(MW)

3. La situation actuelle d'énergie éolienne dans l'Afrique et Algérie:

Si on base sur l'énergie éolienne on doit passer par une situation actuelle dans l'Afrique en générale ou en précise une situation actuelle des énergies éolienne dans l'Algérie et au Maroc.

Le Maroc est le deuxième producteur d'énergie éolienne du continent africain après l'Egypte ou en fin de 2010 elle atteint une puissance de 286 MW ou l'Egypte atteint une valeur de 550 MW d'autre cote en Algérie l'éolienne sont en cours de développent ou il y'a une puissance de 14MW en fin 2010. [S5]

4. Définition d'un système éolien :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ce système connus sous l'appellation anglaise *Wind Energy Conversion Systems (WECS)*, (**Figure I-2**). [3]

Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter [7]:

- ✓ Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales del'éolienne, orientation de la nacelle).
- ✓ Un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

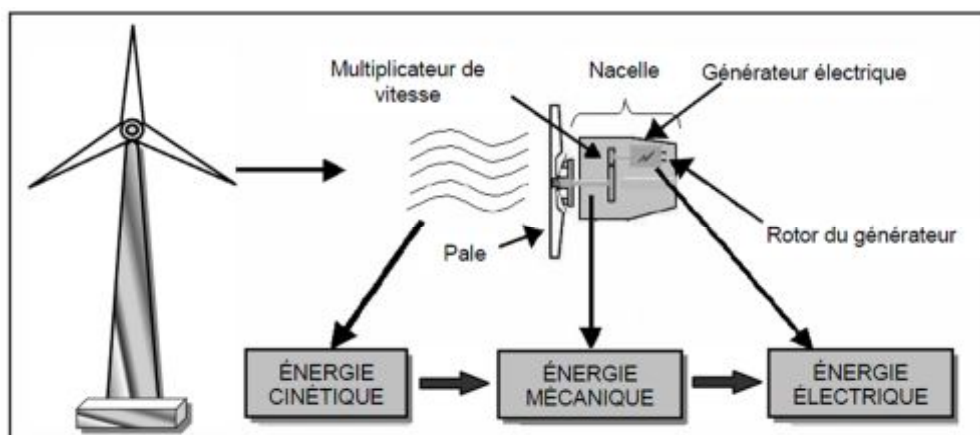


Figure I-2 : conversion de l'énergie cinétique du vent

5. Descriptif et qualité de l'énergie éolienne :

5.1. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable", géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. [6]

De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

5.2. emplacement des parcs éoliens :

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les cotes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en termes de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits. Ces derniers comportent des dizaines d'éoliennes comme on peut le voir sur la **Figure I-3** [3], [8]

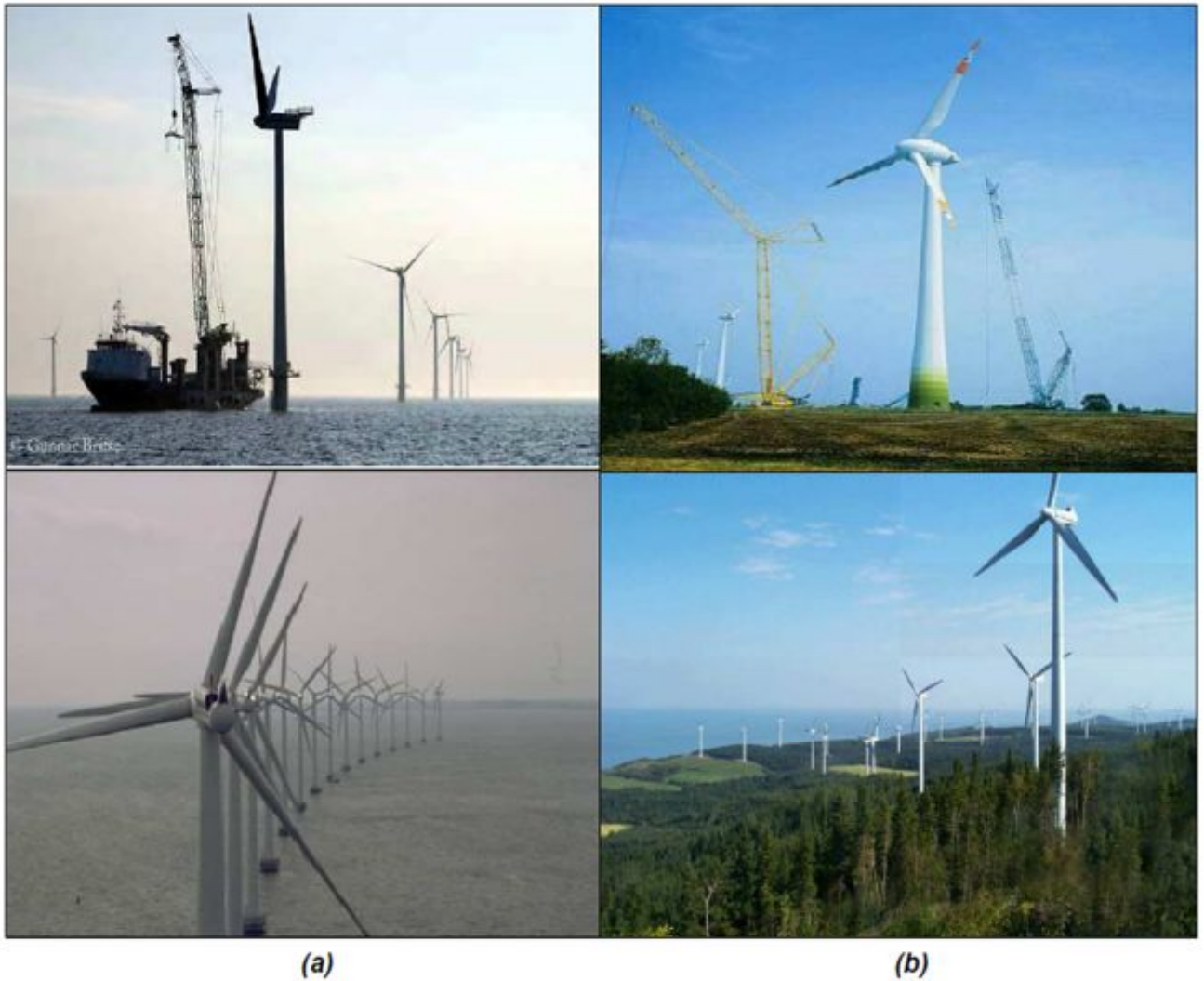


Figure I-3 : installation d'un parc éolienne

5.3. Taille des aérogénérateurs :

Avec le développement récent et le besoin fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent en point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce qui présente la **Figure I-4**. Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent. [3]

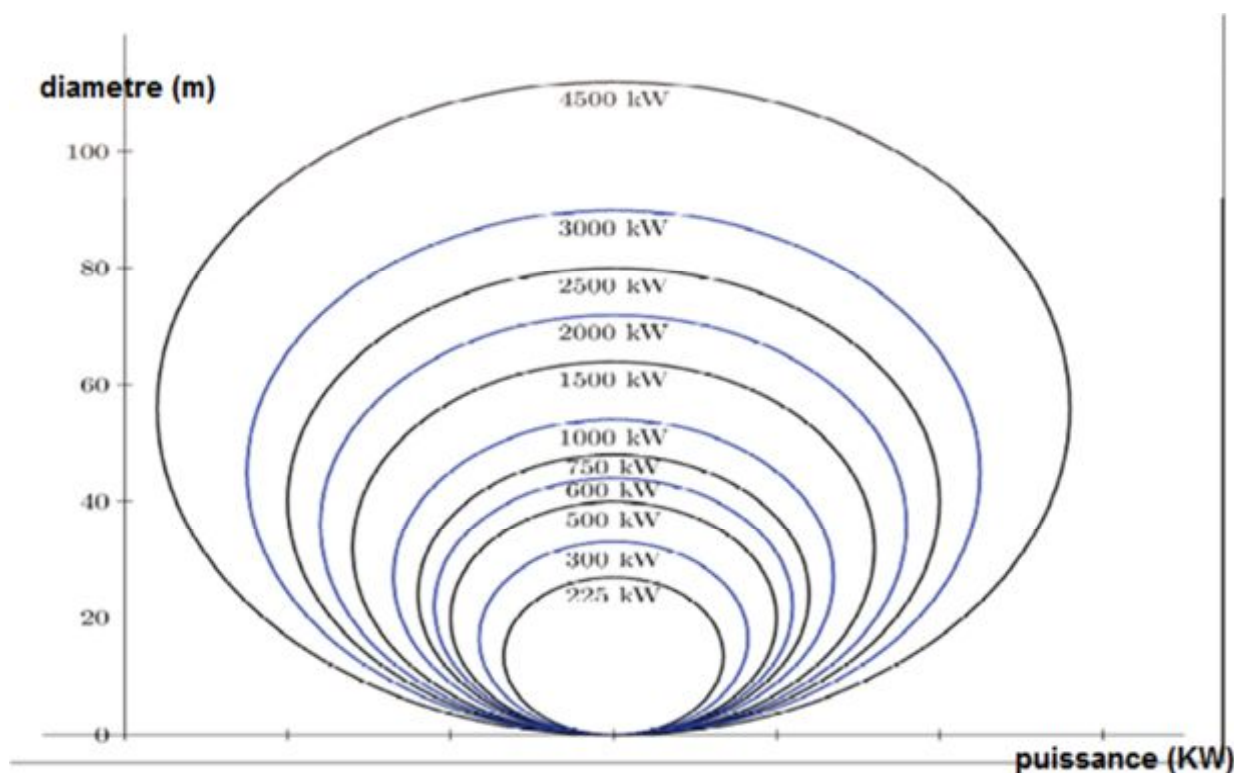


Figure I-4 : taille des hélices en mètre et puissance en KW

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une béliée de plus de 100 mètres de diamètre. Cette hélice est perchée à plus de 100 mètres de hauteur pour produire jusqu'à 4.5MW. [3]

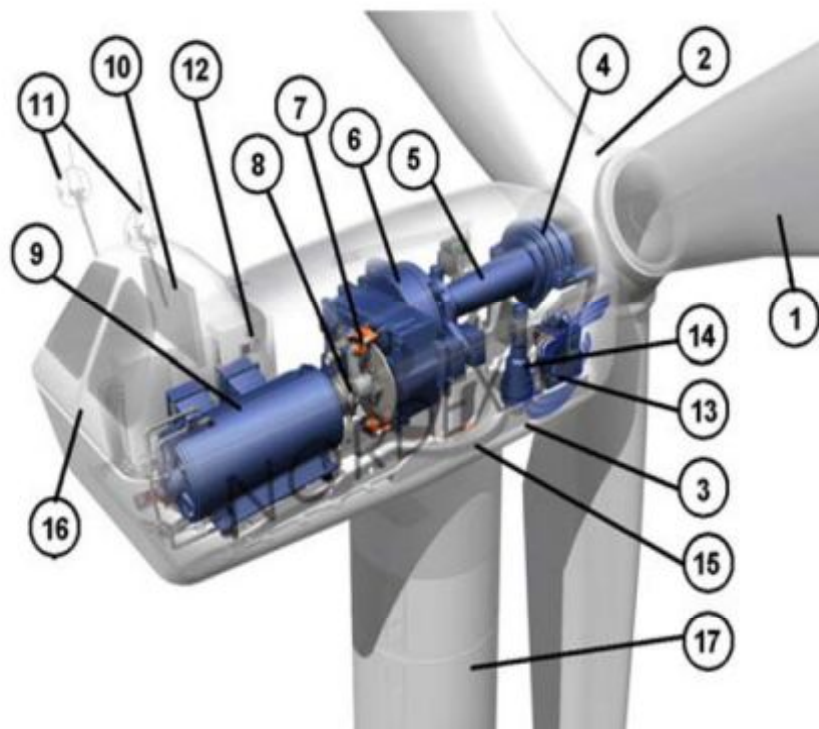
5.4. Principaux composants d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne « classique » est généralement constituée de trois éléments principaux : [9],[5], [6],[7]

- ✚ **Le mat**, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de diamètre mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mat de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : NORDEX N90 2.3MW : diamètre de 90m, mat de 80 m).
- ✚ **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

✚ **Le rotor**, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

- Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.
- Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).



1: pales, 2: moyeu rotor, 3: nacelle, 4: cardan, 5: transmission, 6: multiplicateur de vitesse, 7: frein à disque, 8: accouplement, 9: génératrice, 10: radiateur de refroidissement, 11: centrale de mesures du vent, 12: contrôle, 13: centrale hydraulique, 14: mécanisme d'orientation face au vent, 15: paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16: capot, 17: mât.

Figure I-5 : différentes parties d'une éolienne NORDEX N60 (1,3MW)

6. Conception mécanique des éoliennes :

Selon l'utilisation et la technologie d'éolienne, certaines de ces parties sont plus au moins développées. On distingue deux grandes familles d'éoliennes : [3]

- ✓ Les éoliennes autonomes
- ✓ Les éoliennes raccordées au réseau

La conception mécanique peut aussi aboutir à des éoliennes totalement différentes :

- ✓ Axe rotor vertical
- ✓ Axe rotor horizontal
- ✓ Hélice face au vent
- ✓ Hélice sous le vent
- ✓ Avec ou sans multiplicateur de vitesse

Il y a donc une éolienne adaptée à chaque utilisation avec un certain niveau de technologie et donc une robustesse qui peut en dépendre. L'architecture générale des aérogénérateurs peut également dépendre de nombreux facteurs comme le site d'implantation, l'impact sur le paysage, la technologie employée [10].

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celle à axe vertical et celles à axe horizontal.

6.1. Éolienne à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier. Une éolienne à axe vertical est surtout utile dans les endroits où il n'y a pas beaucoup de place : en ville, sur le toit d'un immeuble ou sur le toit d'une maison. [6]

Il existe deux types d'éoliennes à axe vertical : **Savonius** et **Darrieus**.

6.1.1. Les éoliennes à axe vertical de type Savonius :

Les éoliennes de type Savonius possèdent un rotor composé de deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe. Ces machines ont l'avantage d'être très peu encombrantes et esthétiques et elles peuvent facilement se placer sur le toit d'une maison. Elles démarrent avec une faible vitesse de vent contrairement aux éoliennes de type **Darrieus**. Peu bruyantes, elles s'intègrent parfaitement en ville et il n'y a pas de contraintes sur la direction du vent. L'inconvénient est le rendement assez faible car ces machines sont assez lourdes. [11], [12]

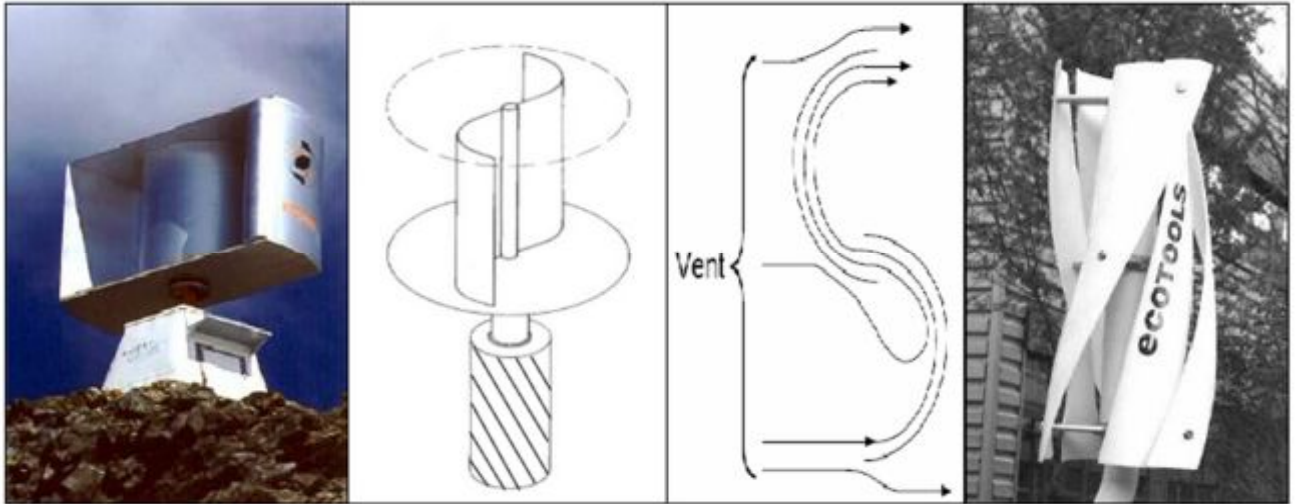


Figure I-6 : éoliennes à axe vertical de type savonius

6.1.2. Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus :

Les éoliennes de type Darrieus peuvent développer une puissance plus grande que les éoliennes Savonius mais sont plus complexes et sophistiquées. Elles sont peu répandues, l'inconvénient majeur étant qu'elle ne peut pas démarrer toutes seules. [13], [12]



Figure I-7 : éolienne à axe vertical type darrieus

6.1.3. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical [16]

Inconvénients :

- Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne et ne dépassent que très rarement 500kW en raison de leur grande sensibilité.
- Ce type d'éoliennes reste assez méconnu, pourtant en dépit de leurs inconvénients elles apparaissent plus adaptées à certains environnements que les éoliennes classiques horizontales à trois pales.

Avantages :

- Elles ne connaissent pas les limites dues à la taille des pales et à la vitesse des vents, elles peuvent donc être beaucoup plus adaptées et performantes dans les zones de vent extrêmes.
- Elles prennent moins de place que les éoliennes classiques et parfois peuvent être plus économiques que celles-ci.
- Cette technologie d'éoliennes est bien adaptée dans les zones de vents perturbées par des habitations et le relief de la végétation.
- Elles sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice).
- Le principe aérodynamique permet de bon rendement pour des vitesses de vent faible, elles s'autorégulent en vitesse pour les vents forts, elles ont un niveau sonore très faible voir inaudible mais elle ne convient pas pour des grandes puissances (<10Kw).

6.2. Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus utilisées. Elles sont basées sur le modèle des moulins à vent : l'hélice contient deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Il existe également des éoliennes horizontales monopales mais celles-ci sont très rares. Les éoliennes à deux pales et les éoliennes à trois pales fonctionnent sur le même principe. Le rendement des éoliennes à axe horizontal est supérieures à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont également plus solides et coûtent moins cher à la fabrication [3]



Figure I-8 : éolienne à axe horizontal

6.2.1. Avantage :

Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol, à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.

6.2.2. Eolienne sous le vent :

Ce sont les plus simples car ici le positionnement du rotor est naturel et automatique en fonction de la direction du vent. Le rotor se situe alors derrière le pylône. Cependant, comme la liaison électrique s'effectue le plus souvent par des câbles pour les aérogénérateurs de forte puissance, il faut quand même prévoir un système d'orientation permettant leur détorsion.

Un grand avantage de ce montage réside dans le fait que les pales du rotor peuvent être plus flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône. Par fort vent, la flexion des pales enlève une partie de l'effort de poussée sur le rotor. Une éolienne sous le vent a donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent.

Par contre, le pylône (bien qu'il soit plus petit) fait obstacle au vent et lorsque la pale passe dans l'ombre de celui-ci, elle subit une forte variation d'efforts de flexion et de rotation. Ceci augmente le risque de rupture de la pale par fatigue du matériau et génère une production fluctuante d'électricité.
[3]



Figure I-9 : petite éolienne sous le vent de 22KW avec pylône léger haubané

6.2.3. Eolienne face au vent :

Ce sont les plus répandues. Le rotor est orienté dans la direction du vent afin que le vent en amont ne soit pas perturbé par le pylône, comme on le voit sur la **figure I-10** . A l'arrière du pylône, il y'a en effet de fortes perturbations du vent, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le pylône.

Il en est de même devant le pylône mais dans les moindres proportions. C'est pour cette raison que le rotor se trouve à une certaine distance du pylône. Cependant, chaque fois qu'une des pales passe devant le pylône, la puissance instantanée de l'éolienne diminue brièvement. Ce phénomène est cependant composé par la forte inertie de l'hélice.

Les pales des éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le pylône par fort vent. Ceci est l'inconvénient majeur de ce type de structure. En plus, il est obligatoire de munir l'éolienne d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours tourné face au vent. Si elle pivotait librement elle aurait tendance à se mettre naturellement sous le vent, comme un drapeau. Le rotor face au vent est une position d'équilibre instable contrairement à la position rotor sous le vent qui est instable. [3]



Figure I-10 : éolienne face au vent avec pylône cylindrique de grande section

6.2.4. Régulation de la vitesse du rotor :

Pour permettre une production d'électricité sur une large gamme de vitesses de vent, la plupart des éoliennes sont équipées de dispositifs de réglage de l'incidence des pales pour que le rotor fonctionne à vitesse quasiment constante. Ainsi la génératrice produit une tension à fréquence constante pour différents vents. Des machines asynchrones directement connectées au réseau sont alors utilisées. Ceci permet de produire une puissance constante quelle que soit la force du vent, ce qui diminue les perturbations sur le réseau.[3]

6.2.5. Sécurité par grand vent :

Pour éviter l'emballement du rotor par fort vent, les pales sont conçues pour décrocher progressivement à la vitesse critique. Ainsi le rotor ne monte plus en vitesse lorsque le vent augmente à cause des turbulences qui se créent autour de la pale et font diminuer sa portance, réduisant ainsi le

couple produit. Certains rotors sont équipés d'aérofreins placés sur le bord de fuite ou en extrémité des pales comme présente la **Figure I-11**



Figure I-11 : pales d'une éolienne avec système de freinage en bout

Toutes les éoliennes possèdent un frein mécanique de sécurité pour ralentir ou maintenir à l'arrêt le rotor. Le plus généralement, ce sont des freins à disques à commande hydraulique, placés sur l'arbre de générateur. [3]

7. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

7.1. Loi de Betz : [6], [5], [16], [8], [17], [11],[18],[19],[20][21]

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la **Figure I-12** sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho S(V_1+V_2)}{2} \quad (II. 1)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2-V_2^2)}{2} \quad (II. 2)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans :

$$P_m = \frac{\rho S(V_1+V_2)(V_1^2-V_2^2)}{4} \quad (II. 3)$$

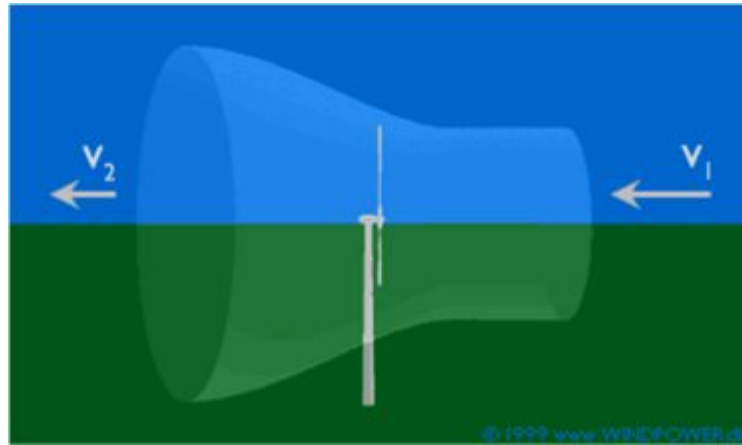


Figure I-12 : théorie de Betz

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (II.4)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (II.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessous, on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit 0.59 .

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

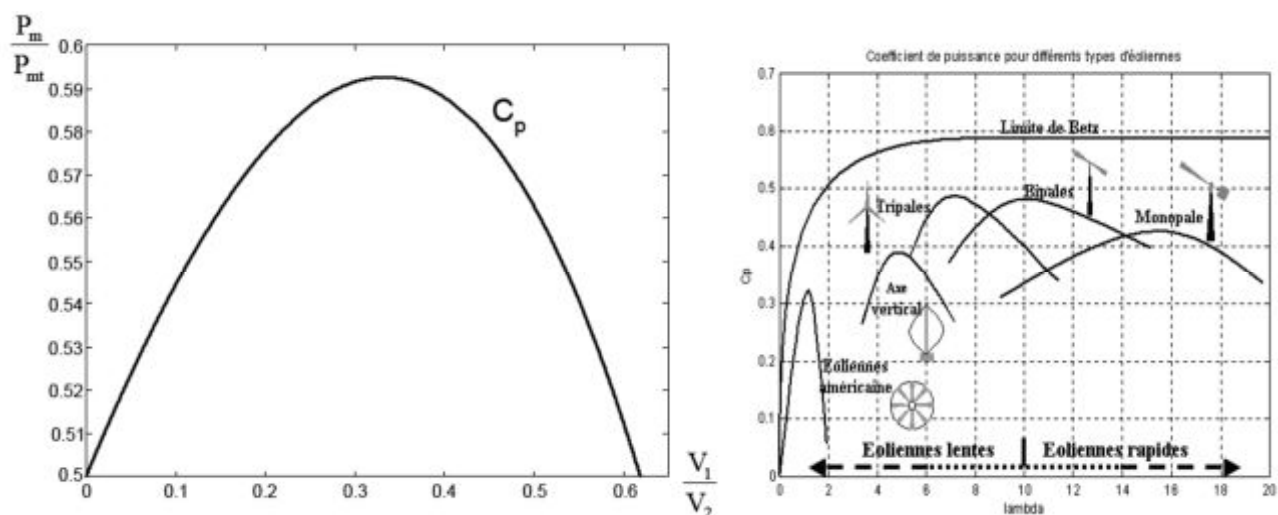


Figure I-13 : coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s. [11] [8] [10] [19]

7.2. Production d'énergie mécanique :

la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (II.6)$$

Avec : $\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1}$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R : rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (II.7)$$

Avec Ω_2 vitesse de rotation après multiplicateur

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

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple. [6]

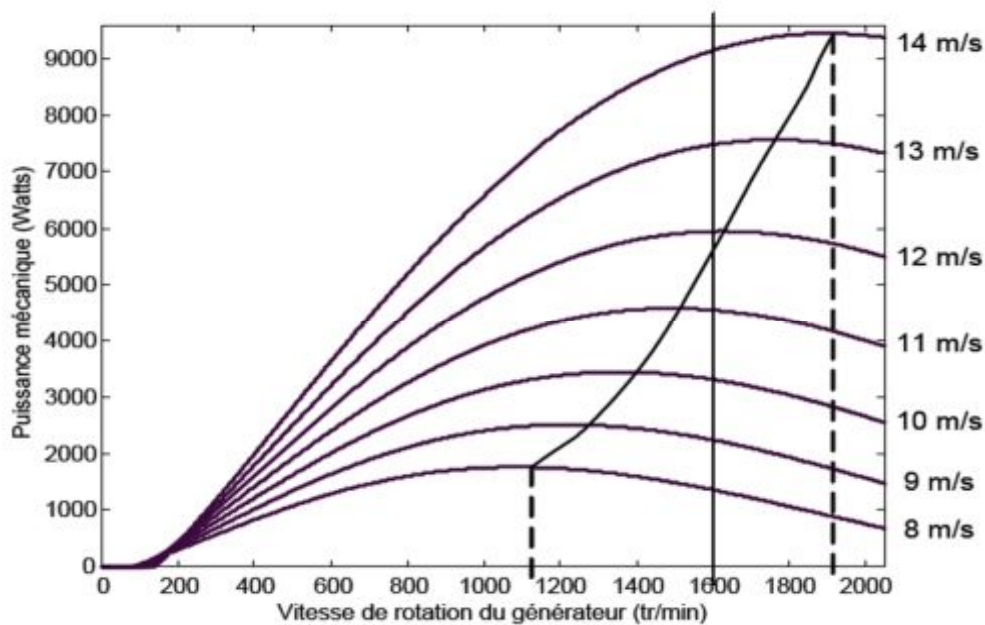


Figure I-14 : puissance théorique disponible pour un type d'éolienne

8. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne :

8.1. Bilan des forces sur une pale :

La **Figure I-15** représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur.

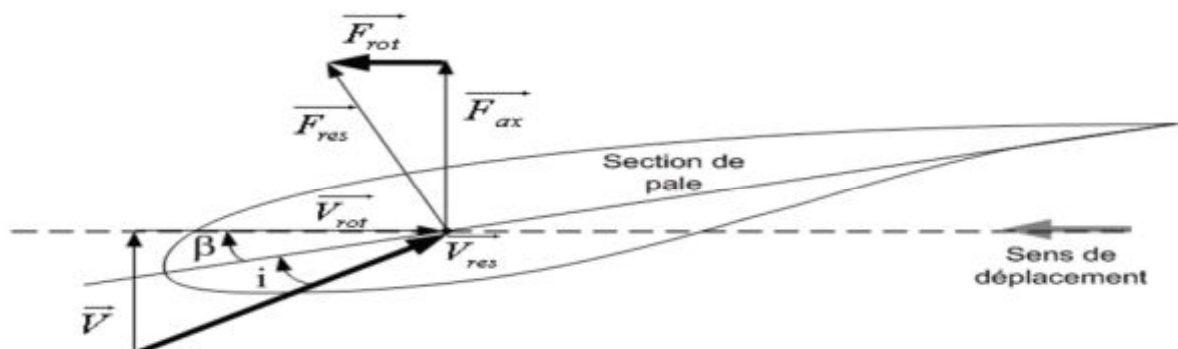


Figure I-15 : bilan des forces sur une pale

La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale. [6][8]

8.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

8.2.1. Systèmes à décrochage aérodynamique « stall » :

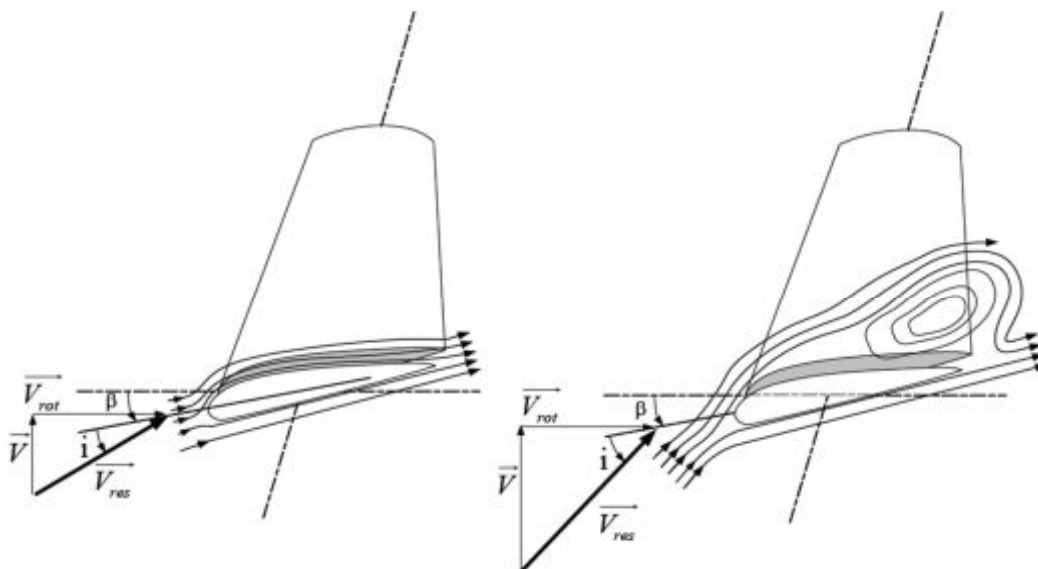


Figure I-16 : flux d'air sur un profil de pale « stall »

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle dit « stall ». Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est-à-dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation. [8]

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système « stall actif ») permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet « stall » de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante. [6]

8.2.2. Systèmes d'orientation des pales « pitch » :

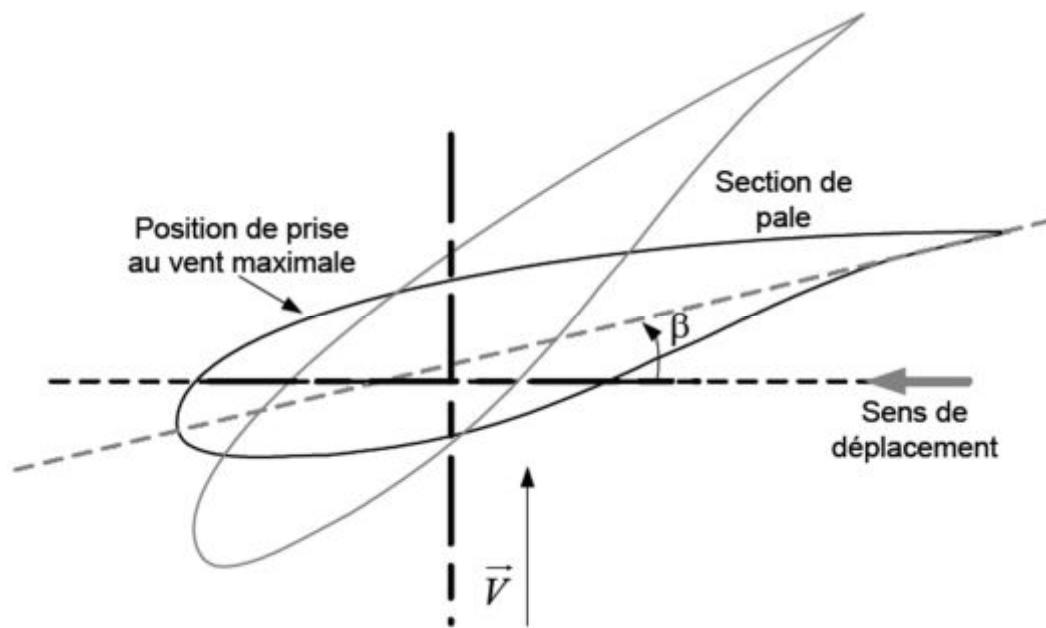


Figure I-17 : variation de l'angle de calage d'une pale

La protection d'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en drapeau des pales de l'hélice. On remarque que ce système intervient dans le fonctionnement de la turbine, par la variation du calage β , de manière prépondérante depuis le démarrage (Figure I-18) zone I, et dans le régime de régulation de vitesse (zone II et III) jusqu'au phénomène de décrochage aérodynamique de la turbine (zone IV) [6] [8]

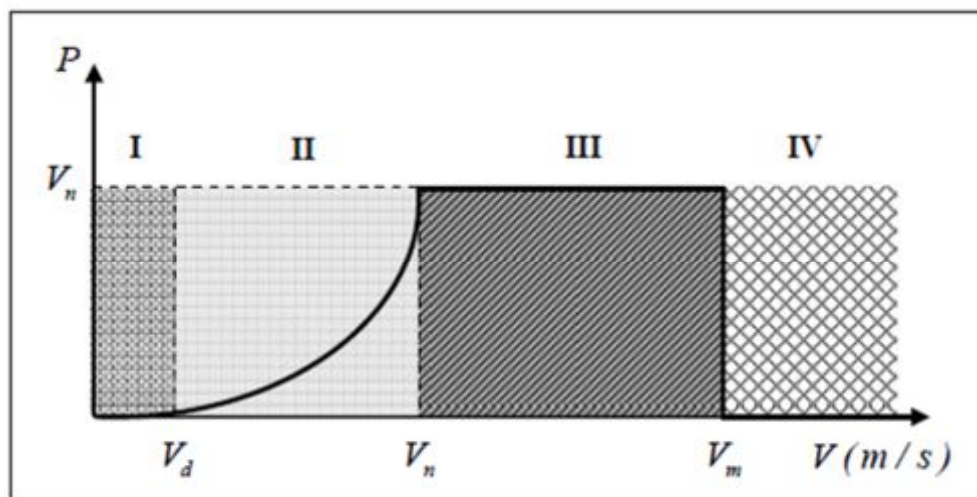


Figure I-18 : courbe typique de régulation

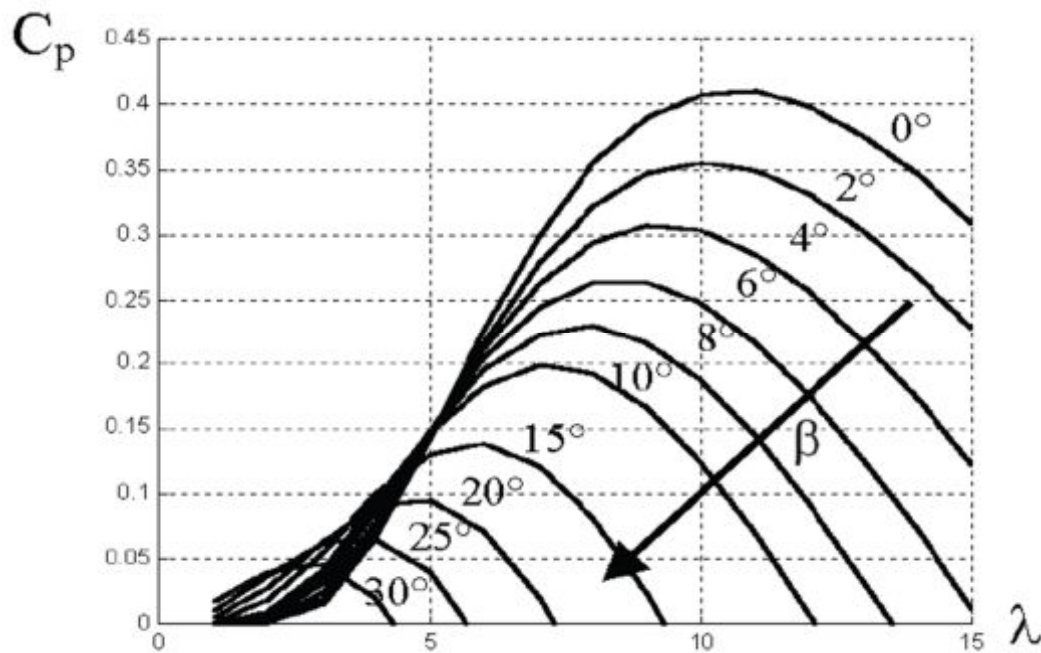


Figure I-19 : influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple

Il utilise la variation de l'angle de calage des pales, en variant l'angle d'incidence de la pale, on modifie le rapport entre les composantes de portance et de trainage, l'angle d'incidence optimal conduit à la puissance maximale disponible. [8]

8.3. Production optimale d'énergie :

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt}

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (II.8)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la **Figure I-20**. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts. [6]

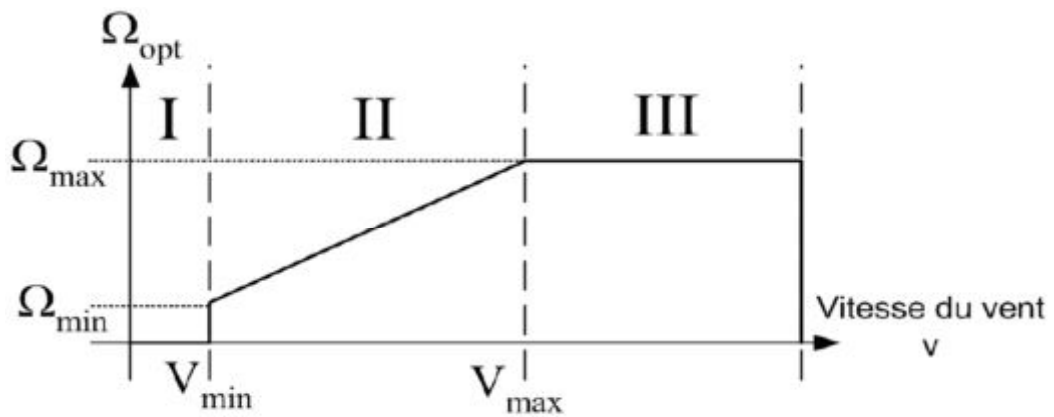


Figure I-20 : loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau

9. Etat de l'art sur la conversion électromécanique :

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques spécifiques.

Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. [6]

9.1. Système utilisant la machine synchrone :

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leur défaut. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante. [6]

9.2. Système utilisant la machine asynchrone :

9.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil :

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. [8]

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau. [6]

9.2.2. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :

Le dispositif de base est représenté sur la (**Figure I-21**). Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. [8]

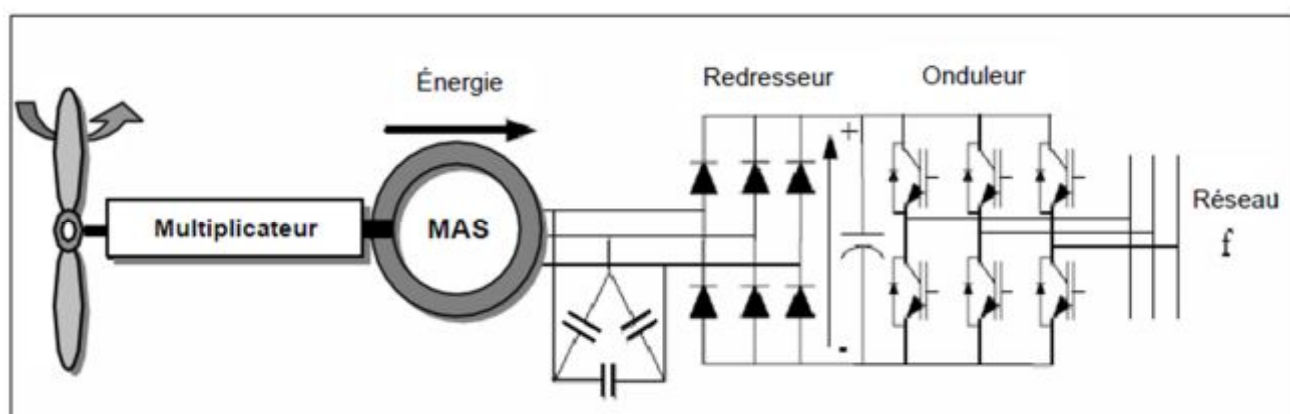


Figure I-21 : Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur-onduleur

9.2.3. Machine asynchrone à double alimentation type « brushless » :

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste : il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques (**Figure I-22**)

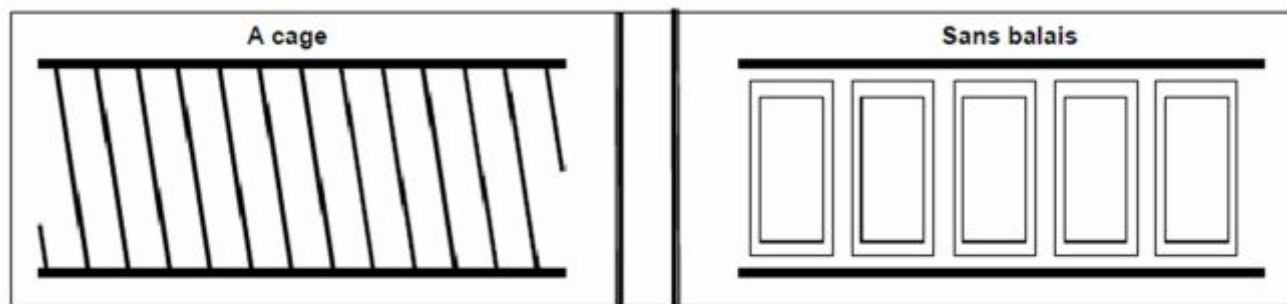


Figure I-22 : Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable. En revanche, le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (*Figure I-23*) [8]

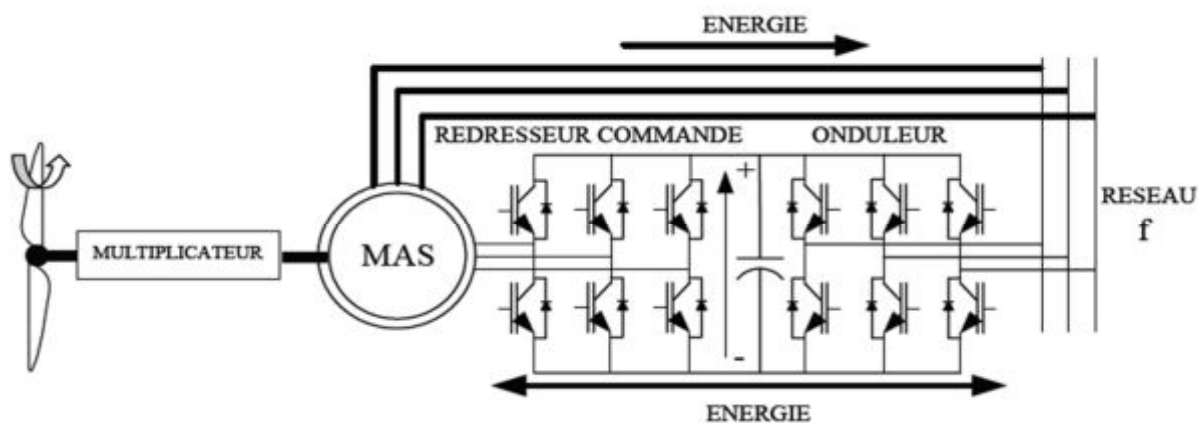


Figure I-23 : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau

9.2.4. Machine asynchrone à double alimentation type « rotor bobiné » :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Cette configuration fera l'objet d'une étude détaillée dans la seconde partie de ce mémoire. [6]

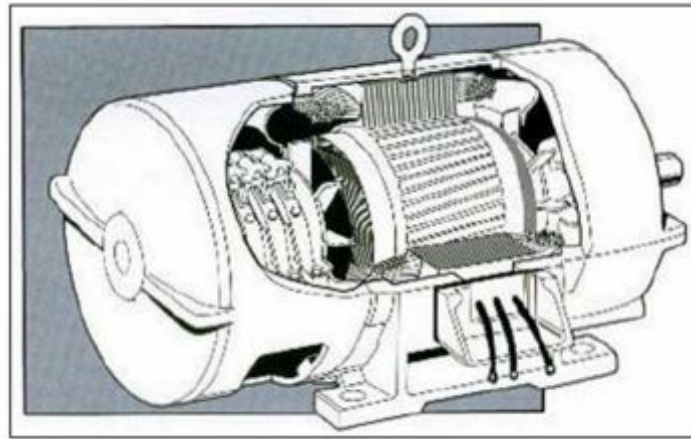


Figure I-24 : Machine asynchrone à rotor bobiné

9.2.4.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la **Figure I-25**, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. [11]

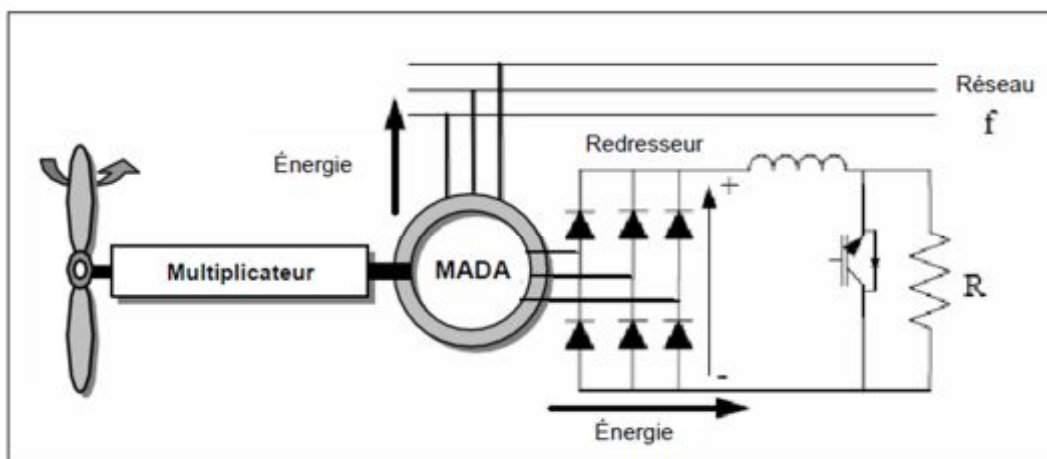


Figure I-25 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

9.2.4.2. Machine asynchrone à double alimentation –structure de Kramer :

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

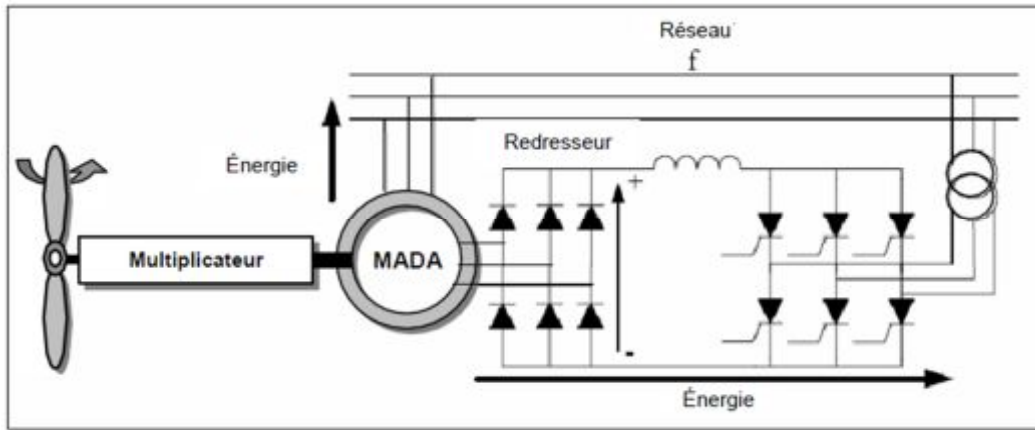


Figure I-26: MADA, structure Kramer

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. [6]

9.2.4.3. Machine asynchrone à double alimentation –structure de Scherbius avec cyclo convertisseur :

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cyclo convertisseur, l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius.

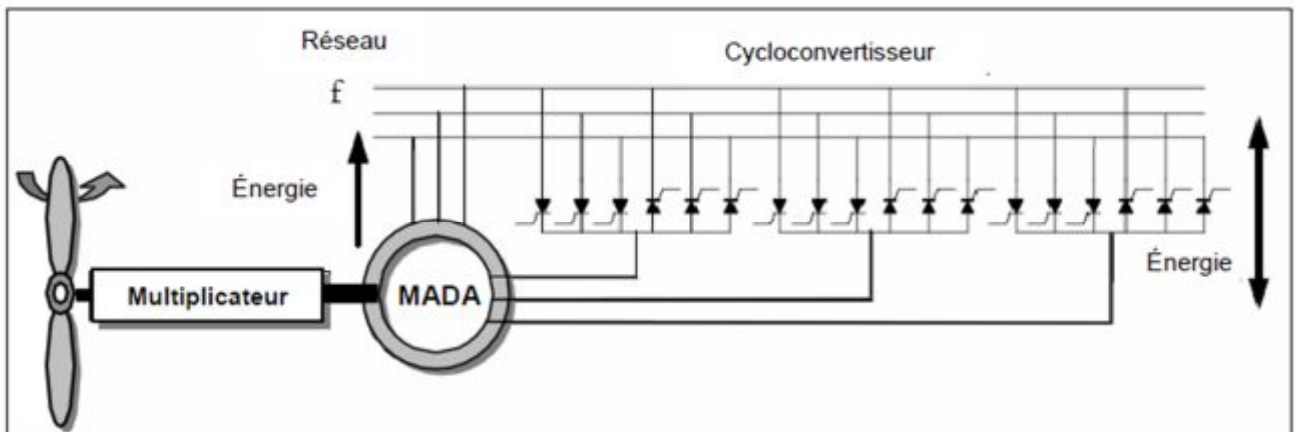
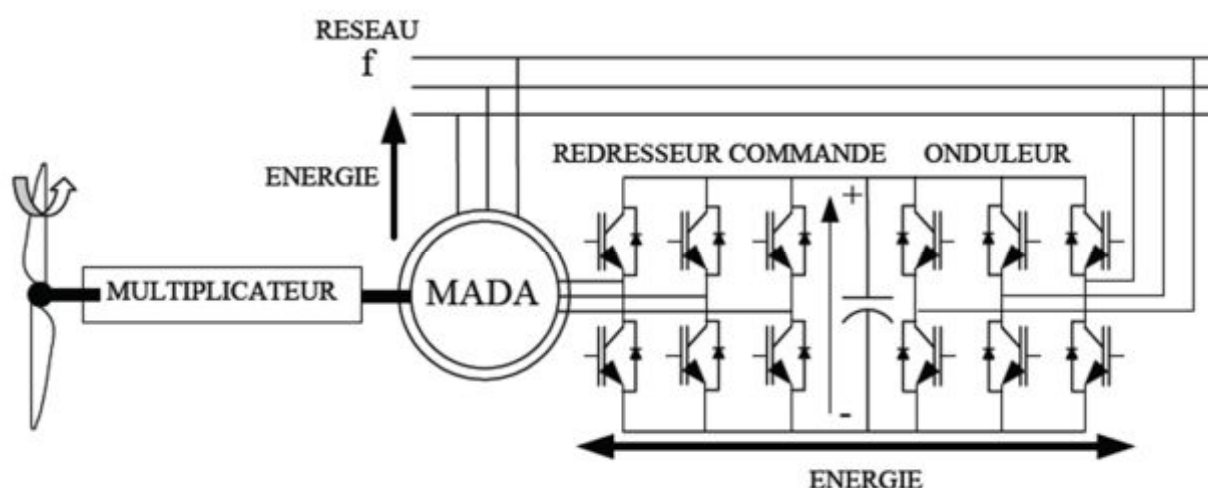


Figure I-27: Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur

Le principe du cyclo convertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI. [8]

9.2.4.4. Machine asynchrone à double alimentation –structure de Scherbius avec convertisseur MLI :

Cette configuration a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cyclo convertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les



fréquences élevées).

Figure I-28: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

La structure du dispositif et la philosophie de fonctionnement sont semblables à celle de la MADA de type "brushless". Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que la machine brushless (un seul bobinage au stator, un autre au rotor). Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. [11]

10. Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne :

Une caractéristique essentielle du vent étant la discontinuité dans le temps, un certain nombre d'études ont eu pour objet d'étudier ou de mettre au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent et non utilisée directement pendant les périodes de production afin d'en restituer une partie, aussi grande que possible, pendant les périodes de calme. [18]

Il existe différentes possibilités de stockage.

- ✚ Pour la production d'électricité, le système de loin le plus utilisé est celui par batteries d'accumulateurs. Celles au plomb, bien que lourdes et encombrantes, s'accommodent bien des fluctuations propres au vent. Les autres types sont maladaptés. Toutefois, ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW tout au plus.

- ✚ Pour les stockages importants, on peut faire appel au pompage de l'eau entre deux réservoirs et une turbine si le terrain fournit une possibilité intéressante en dénivelé. Le simple pompage de l'eau dans un réservoir est aussi la solution pour stocker de l'eau dans le cas, par exemple, de distribution d'eau alimentaire. Principe : l'énergie éolienne sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie.
- ✚ Le stockage thermique commence aussi à se développer, essentiellement pour le chauffage. Les différents types de stockage thermique existant sont utilisés : réservoir de fluides, chauffage de produits à haute capacité thermique, etc. Principe : l'énergie produite est utilisée pour chauffer le fluide d'un réservoir qui restituera pendant les périodes sans vent l'énergie stockée.

11. Avantages et inconvénient d'éolienne:

11.1. Avantages

Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources renouvelables D'énergie, l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages propres : [11]

- ✚ Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre ;
- ✚ Elle ne nécessite aucun carburant ;
- ✚ Elle ne crée pas de gaz à effet de serre (sauf si l'on considère que ce type d'énergie est intermittent et nécessite l'utilisation de centrales thermiques constamment afin de réguler les variations imprévisibles de la production éolienne) ;
- ✚ Chaque mégawatt heure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique ;
- ✚ Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car elle est entièrement en métal et plastique ;
- ✚ Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations ;
- ✚ Les propriétaires fonciers reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.
- ✚ L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple ;
- ✚ Les éoliennes permettent au travers de la taxe professionnelle de participer au développement local.
- ✚ Une éolienne est en grande partie recyclable car construite en acier. Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans) elle est entièrement démontable, on peut même si besoin retirer la fondation en béton. Elle n'aura laissé aucun produit contaminant autour d'elle et pourra être très facilement remplacée.

11.2. Inconvénients :

L'énergie intermittente et imprévisible produite par l'éolien nécessite une régulation par des centrales thermiques, dont les inconvénients doivent être pris en considération. [11]

- ✚ Les riverains déplorent le bruit des éoliennes : le bruit peut être d'origine mécanique ou d'origine aérodynamique. En effet, selon l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), le niveau sonore d'une éolienne est de 50 dB à 150 mètres et devient imperceptible au-delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne ;
- ✚ La réception des ondes hertziennes peut être perturbée, ce qui provoque une image bruitée sur les récepteurs de télévision. Dans ce cas, il est fréquent que la société implantant les éoliennes finance la construction d'un nouvel émetteur de télévision ;

- ✚ Des flashes très puissants sont émis toutes les cinq secondes en haut des mats éoliens à la demande de l'aviation civile. Ces flashes perturbent la quiétude nocturne de la campagne et sont une pollution lumineuse supplémentaire ;
- ✚ Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux. se montre favorable au développement de parcs éoliens si ceux-ci sont construits en suivant ses recommandations ;
- ✚ Les parcs éoliens produisent des interférences avec les radars et en particulier avec les radars météorologiques. En effet, les éoliennes peuvent constituer un obstacle à la propagation de l'onde. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données. De plus, comme les pales sont en rotation, le radar note leur vitesse de déplacement qui est indifférenciable d'une cible en mouvement comme la pluie. Habituellement, on filtre les échos indésirables de sol par leur vitesse Doppler. Dans le cas d'une précipitation, la vitesse enregistrée sera un mélange entre la vitesse des gouttes et celle des pales ce qui peut mener à une fausse interprétation des mouvements de l'air. Une étude sur ce possible interférence est donc nécessaire lors de l'examen d'un projet d'éoliennes ;
- ✚ Par son principe de fonctionnement même, une éolienne absorbe l'énergie du vent et le rend turbulent, créant ainsi un effet de sillage jusqu'à 10 diamètres de rotor derrière elle.

12. Conclusion :

Dans ce chapitre a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. La seconde partie de ce chapitre présente les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien. Deux grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machine synchrones.

Le deuxième chapitre de nos travaux, est consacré à une étude détaillée et modélisation de la machine asynchrone à double alimentation utilisée dans un système éolien à vitesse variable.

Chapitre II

Etude et modélisation de la

MADA

1. Introduction :

Les machines asynchrones sont les plus utilisées dans les secteurs industriels en raison de leur fiabilité et leur construction simples. Elles occupent plus de 80% dans le domaine de conversion électromécanique d'énergie. Leur dynamique non linéaire est un problème assez délicat car elle rend la commande très difficile. De nos jours, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude de la machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière et grâce au développement des équipements de l'électronique de puissance et l'apparition des techniques de commande modernes présente une solution idéale pour les entraînements à hautes puissances et à vitesse variable. L'intérêt de telles machines est qu'elles assurent un fonctionnement à très basse vitesse [22]. L'application potentielle de la MADA a été un sujet de recherche le long de la dernière décennie [23]. L'association des machines asynchrones à double alimentation à des convertisseurs statiques permet de donner différentes stratégies de commande et présente un autre avantage d'utilisation de ces machines[24]. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. [6]

Maintenant que nous disposons d'une modélisation électrique et mécanique, il nous faut choisir et modéliser la génératrice. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné, ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent.

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande, ses avantages et inconvénients et évaluer les performances apportées par cette machine. On présentera aussi sa modélisation dans le repère de Park avec ses deux alimentations à fréquences variables, l'une alimente le stator et l'autre alimente le rotor.

2. Présentation de la machine asynchrone à double alimentation :

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 ; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures ; elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. La figure suivante représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation. [25]

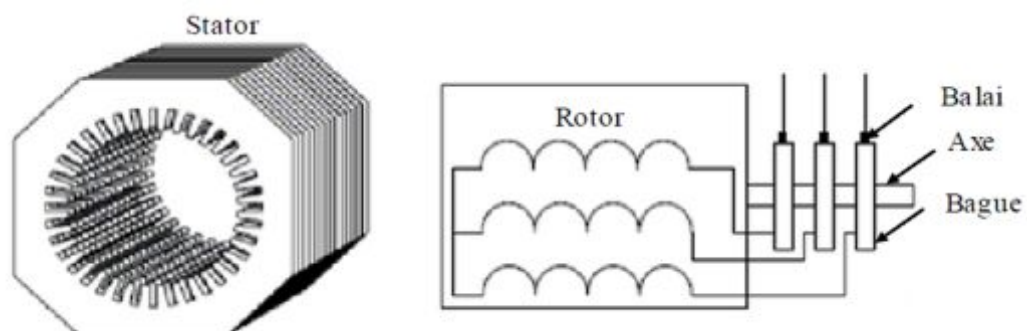


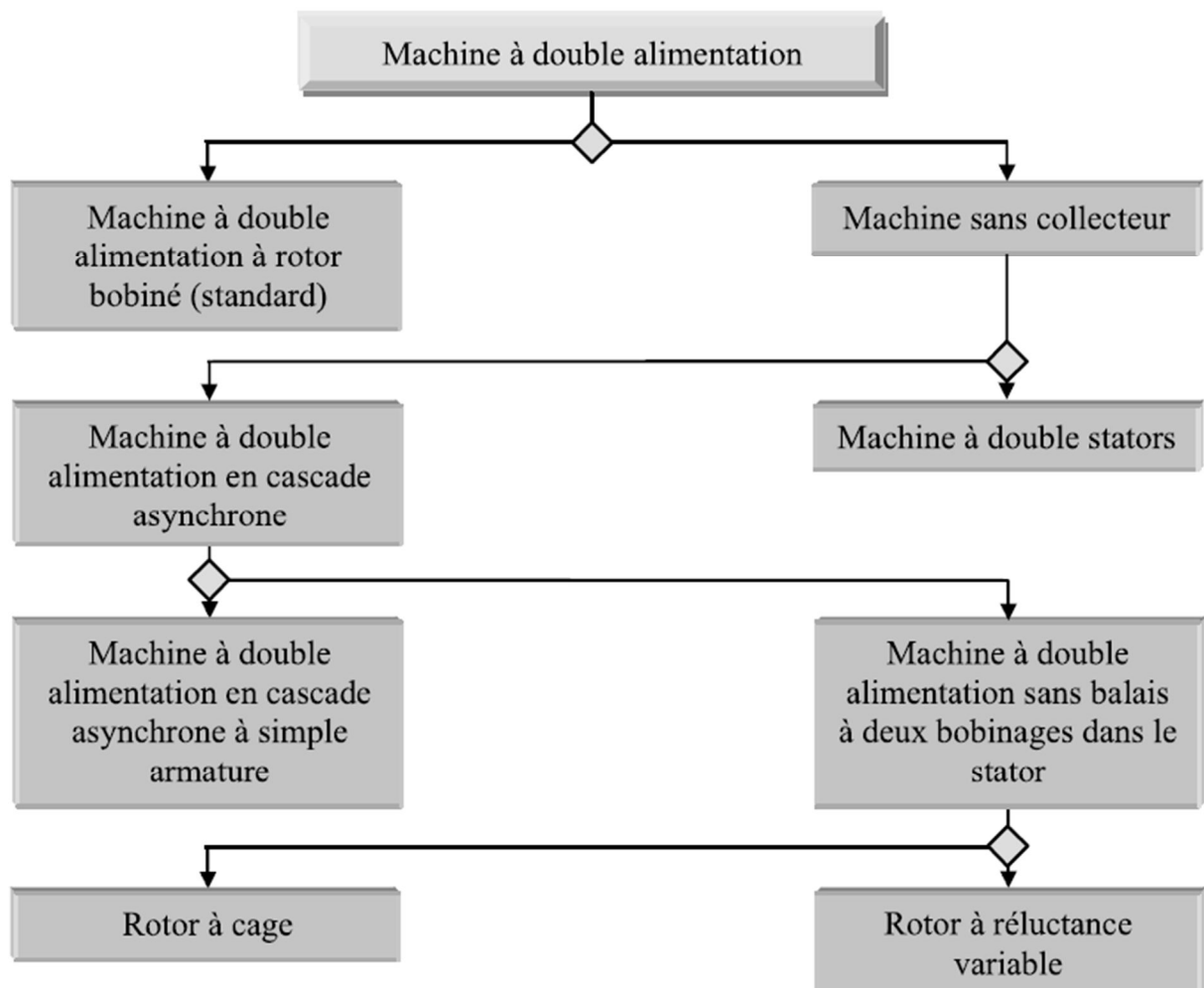
Figure II-1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général. [26]

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux cotés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'entraînement et de génération à vitesse variable, dont le glissement peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction. [27]

3. Classification des machines à double alimentation :

La classification de la machine asynchrone à rotor bobiné est obtenue à partir d'une recherche bibliographique qui a été développée dans la littérature du domaine des machines à double alimentation. [27]



Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives et les plus développées dans la littérature sont classifiées par un organigramme donné précédemment le schéma de principe et la description de chaque variante seront détaillés ci-dessous. [28]

3.1. Machine à double alimentation à rotor bobiné :

Est une machine asynchrone occupée par un système balais-bague dont les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé, le rotor est relié à son propre onduleur (single doubly fed induction machine), la figure présente un schéma de principe de cette catégorie de MADA. [28]

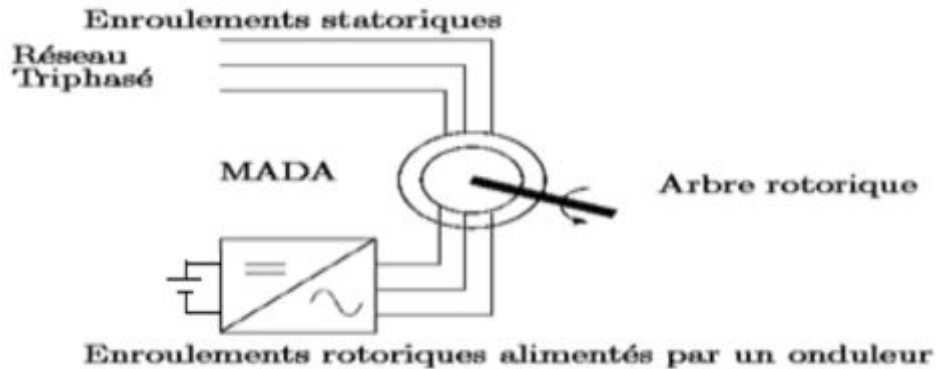


Figure II-2 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné

3.2. Machine à double alimentation en cascade :

Est une machine à double alimentation consiste en deux machines asynchrones a double alimentation dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement (cascaded doubly fed induction machine), la figure présente le schémade principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées. [28]

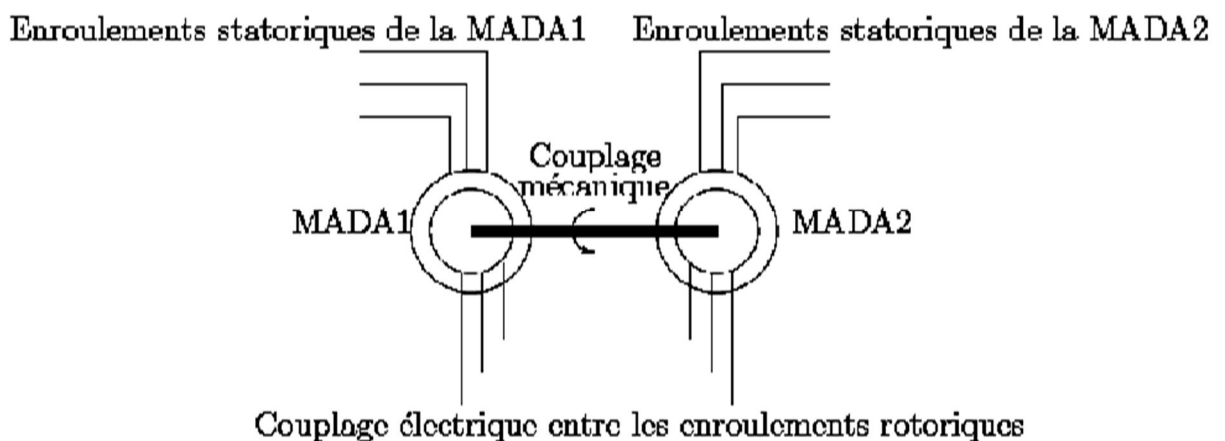


Figure II-3 : Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor

3.3. Machine à double alimentation cascadée à un repère :

Il s'agit de deux machines à cage dont l'axe rotorique est identique. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines.

Une machine a son stator relié au réseau, l'autre à un onduleur (single frame cascade doubly fed induction) [24].

3.4. Machine à double alimentation sans balais :

C'est une machine très proche de la précédente, sauf que cette fois-ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écurueil.(brushless doubly fed machine). La figure présente le schéma de principe de ce type de machine. [28]

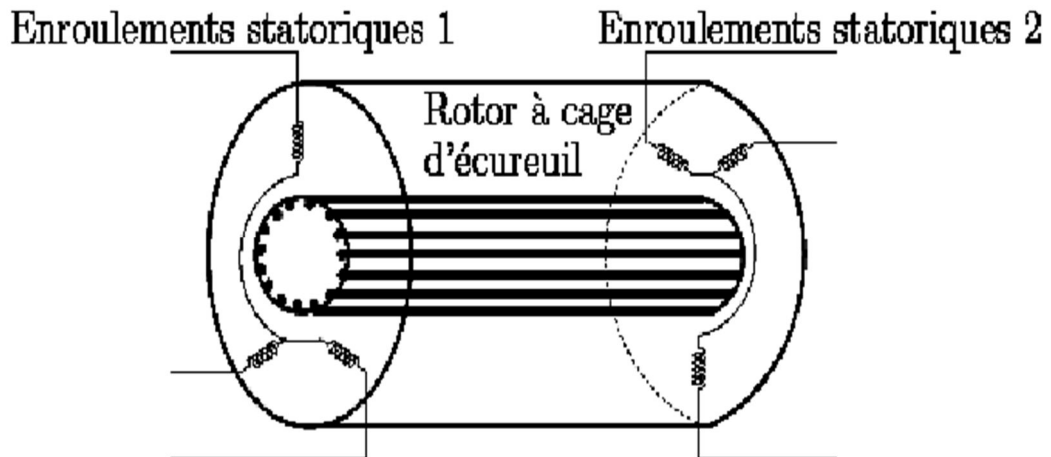


Figure II-4 : Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor

3.5. Machine à double alimentation à reluctance variable :

Est une machine utilisant le principe d'un rotor de moteur à reluctance variable. Elle est nommée doubly fed reluctance machine.

3.6. Machine à double alimentation TANDEM :

C'est une machine possédant un rotor à cage et deux enroulements statoriques: l'un est fixe, l'autre peut être tournant.

Ainsi, l'on constate que sous la même dénomination, plusieurs configurations et constructions de MADA sont possibles.

4. Comparaison entre les différentes variantes de la machine à double alimentation :

Le tableau donne une brève classification et comparaison des différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives dans la littérature. Dans ce cas les critères de comparaison sont fondés sur : la complexité de la construction de la machine, la puissance traitée par le convertisseur associé à la machine et la stratégie de contrôle. [27]

Type de la machine à double alimentation	Construction de machine	Convertisseur de puissance	Méthode de commande
Machine à rotor bobiné	Etablie	Dépend de la vitesse opérationnelle	Orientation du flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive
Machine en cascade asynchrone	Difficile	Comme la machine à rotor bobiné	Orientation du flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive
Machine sans balais	Spécial, prototypes disponibles et toujours en recherche	Comme la machine à rotor bobiné	Orientation du flux rotorique et orientation simplifiée du flux rotorique comme la machine à rotor bobiné
Machine à réluctance variable	Spécial, prototypes disponibles et toujours en recherche	Comme la machine à rotor bobiné	Comme la machine à rotor bobiné

Tableau II-1 : classification et comparaison des différentes variantes de la MADA

Jusqu'à présent et grâce à l'évolution récente dans les domaines de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné reste la machine la plus attractive de l'avis de nombreux chercheurs, vu qu'elle est bien adaptée dans plusieurs domaines d'application. En effet, elle présente une construction établie et simple par rapport aux autres types.

5. Principe de fonctionnement de la MADA :

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de f_{mms} des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$, et le rotor tourne avec la vitesse ω ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f_{mms} des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que [22]:

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s g \quad (II.1)$$

Où : g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de Synchronisme les sens seront opposés [29].

Pour que la rotation du vecteur résultant des f_{mms} par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence, définie à partir de $\omega_{gl} = 2\pi f_r$; c'est-à-dire [22] :

$$f_{ro} = f g \quad (II.2)$$

6. Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA :

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor [8]. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrone, il y'a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Le principe de la commande de la MADA en ces modes peut être compris à travers le *Figure II-5*.

P_s : La puissance transitant par le stator

P_r : La puissance transitant par le rotor

P_m : La puissance mécanique

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, « la puissance de glissement » est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hypo-synchrone (quadrant 1).

En mode moteur hyper-synchrone (quadrant 2), une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hypo-synchrone (quadrant 3), une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hyper-synchrone (quadrant 4), la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance est transmise par l'intermédiaire du rotor. [8],[30]

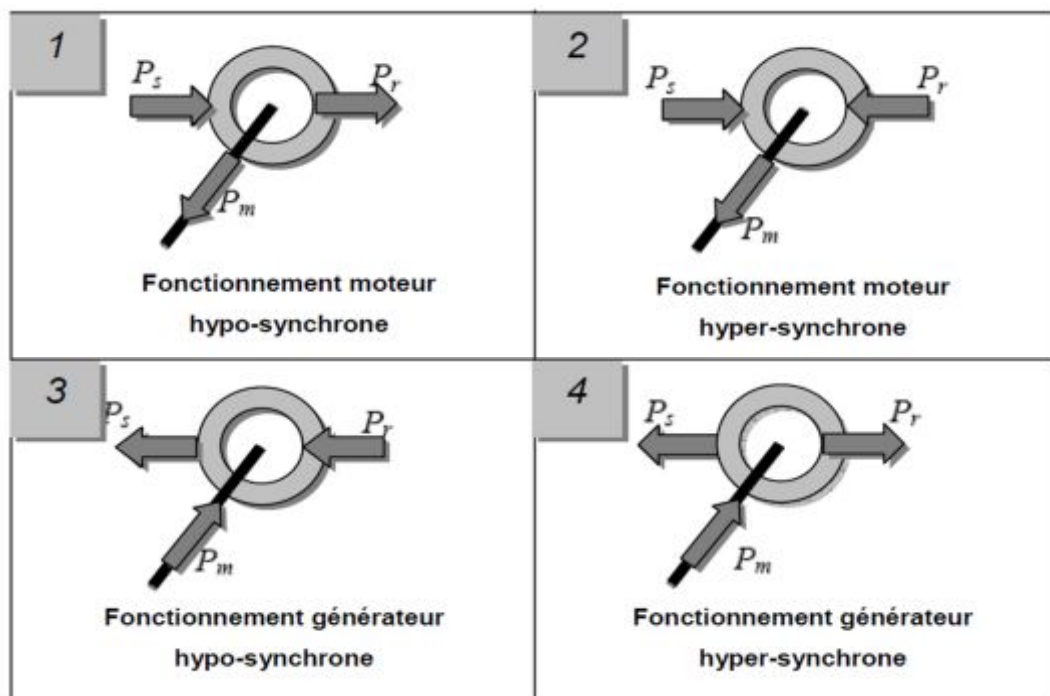


Figure II-5 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au-delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0.7 à 1.3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est-à-dire au maximum 0.3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage. [6], [8]

A titre de comparaison, la **Figure II-6** montre la caractéristique de production optimale pour les deux types de machines (cage d'écureuil avec convertisseur et MADA) dans un système éolien. Nous constatons que si la machine à cage est capable de produire de l'énergie pour les très faibles vitesses très légèrement supérieure au synchronisme. La MADA ne commence à produire qu'à partir de 1000 tr/min de façon à ne pas augmenter la taille du convertisseur rotorique. La puissance totale produite par la MADA est la somme des puissances statorique et rotorique. [8]

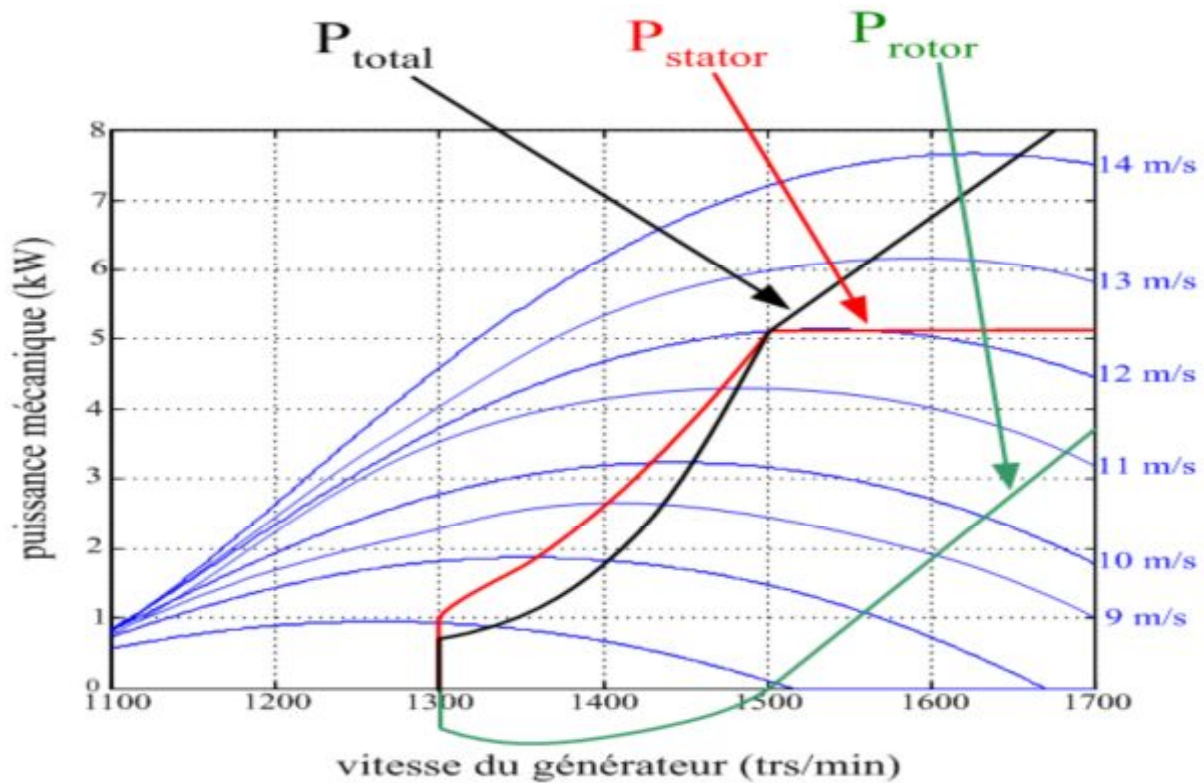


Figure II-6 : caractéristique de production d'énergie optimale de la MADA et de la machine à cage

La puissance totale produite par la MADA est la somme des puissances statorique et rotorique. Or, jusqu'au synchronisme, la puissance rotorique est négative, la MADA produit donc légèrement moins que la machine à cage. En revanche, au-delà du synchronisme, la figure montre que la MADA est capable de produire de l'énergie par l'intermédiaire du rotor jusqu'à 1900 tr/min. [8]

7. Les Différentes stratégies de commande de la MADA :

La structure de la machine asynchrone à double alimentation présente l'avantage de permettre de commander les variables de la machine, telle que, la puissance, la vitesse, le couple. Cette commande est réalisée par plusieurs méthodes et structures ; selon le mode de fonctionnement, la variable à commander et le domaine d'application. [22]

7.1. Commande de la MADA par un seul onduleur :

C'est la stratégie la plus simple et la plus utilisée dans les applications industrielles, cette structure est illustrée par la figure suivante [31]:

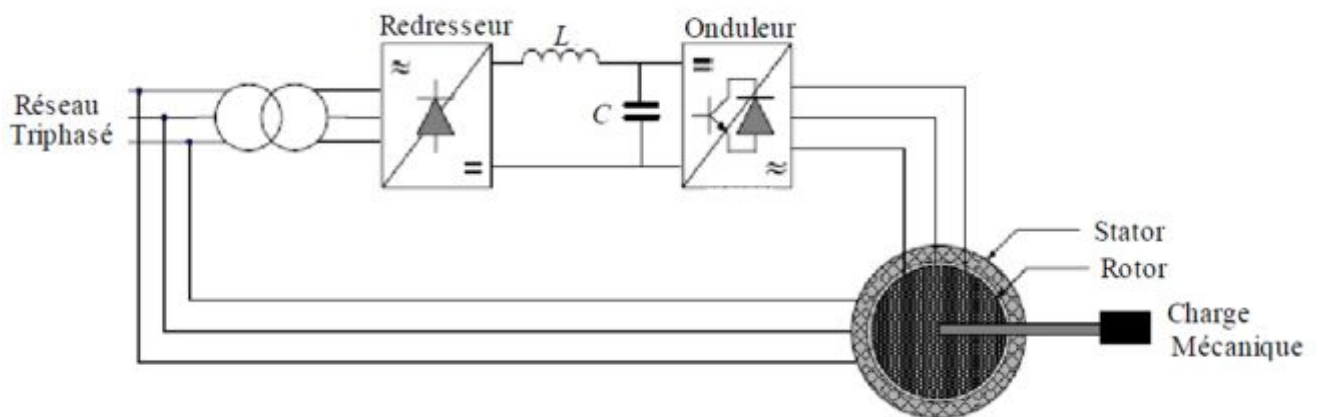


Figure II-7 : MADA commandée par un seul convertisseur alimentant le rotor

Dans cette structure de commande, la MADA est alimentée à son stator par le réseau, tandis que le rotor est alimenté à travers un système de conversion qui comporte un redresseur, un filtre et un onduleur. Cette structure est appelée aussi la cascade hypo synchrone. Elle permet de contrôler la puissance active et réactive statorique à la fois en régime permanent et transitoire [28]. La machine dans ce cas peut fonctionner en moteur ou générateur, mais l'application la plus courante est l'utilisation dans les systèmes de production d'énergie électrique notamment les systèmes éoliens et hydrauliques. On va étudier sa modélisation d'alimentation de cette commande dans le chapitre qui suit [22].

7.2. Commande de la MADA par deux onduleurs:

Cette structure de commande consiste en une MADA alimentée par deux onduleurs, l'un au stator et l'autre au rotor. Elle peut prendre deux formes équivalentes [28], [32], [33]:

- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs. Dans ce cas, c'est le réseau qui est la source du couplage électrique existant entre les deux côtés.
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun, ce dernier est donc une source d'alimentation commune aux deux côtés.

La première forme de cette stratégie de commande est illustrée par la figure suivante [31]:

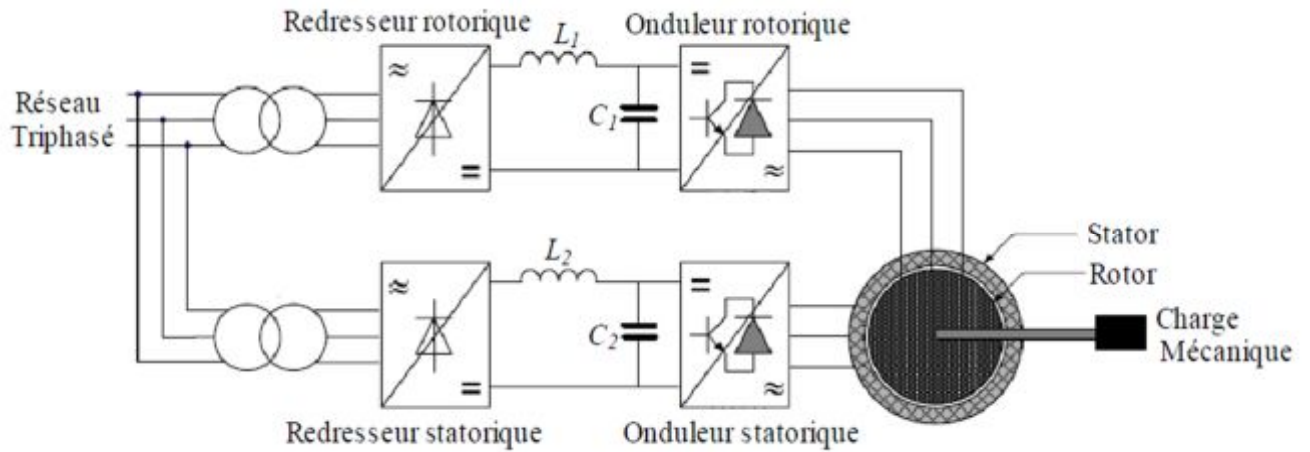


Figure II-8 : MADA commandée par deux onduleurs alimentés à travers deux redresseurs

Cette structure est évidemment la structure la plus générale du système. Les deux redresseurs ont une source d'alimentation commune qui est le réseau triphasé [28].

7.3. Commande de la MADA par un redresseur alimentant deux onduleurs en parallèle:

Sa structure est semblable à la précédente, sauf que les onduleurs sont alimentés par un seul redresseur. Cette structure est représentée par la figure suivante [22]:

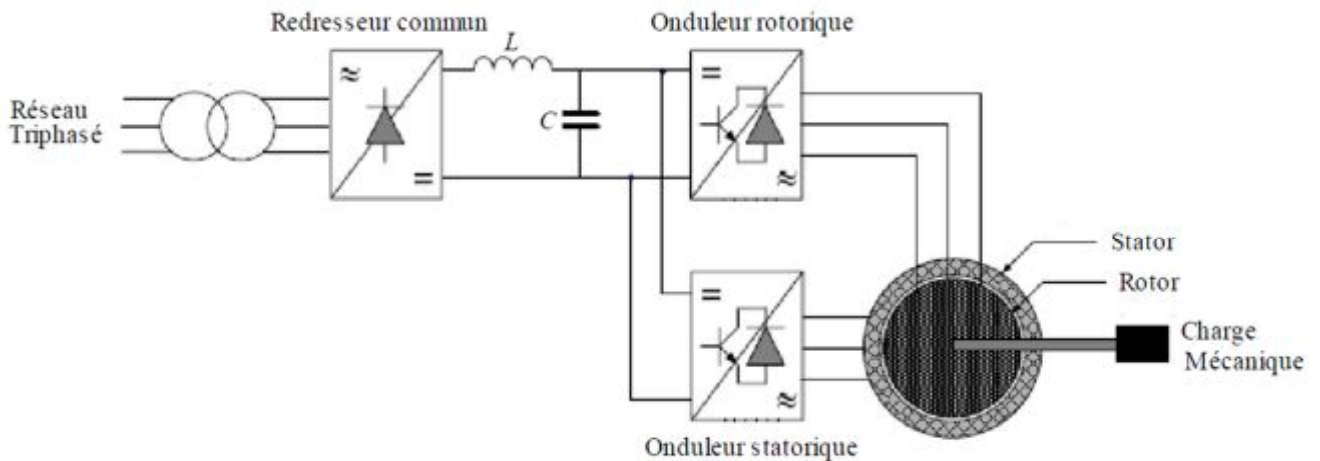


Figure II-9 : Commande de la MADA par deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun

Ces deux dernières structures de commande sont utilisées généralement dans le fonctionnement en moteur, pour les applications de traction électrique [28].

8. Avantages et inconvénients de la MADA:

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

8.1. Avantages de la MADA:

Les principaux avantages de la MADA sont :

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [22].
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse [6,31].
- Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement [22].
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [6].
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [6].
- Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau [22].
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation [31].

8.2. Inconvénients de la MADA:

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer [28].
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix [28].
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [31].

- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [22].

9. Domaines d'application de la MADA:

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [9]. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que [6] :

- ✓ Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- ✓ Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- ✓ Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [28] :

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

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

10. Modélisation de la MADA:

Pour commander la machine asynchrone à double alimentation, comme bien d'autres procédés, il nous faut disposer de son modèle avec une connaissance plus ou moins précise des éléments le constituant. Mathématiquement, on peut représenter la MADA par une modèle entrée sorties sous forme de fonction de transfert ou encore sous forme standard d'équations en variables d'état [22].

A partir de ce modèle, on peut faire la conception et la simulation des algorithmes de commande ; ainsi que l'étude et l'analyse des régimes transitoires. De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle comportemental. Une première difficulté réside dans la commande de cette machine à cause du couplage du flux magnétique et du couple électromagnétique ; la deuxième est liée à l'identification des paramètres.

Dans la littérature, nous discernons principalement trois approches concernant la modélisation des machines électriques [22] :

- La modélisation de Park ;

- La modélisation par réseaux de perméances ;
- La modélisation par éléments finis.

Dans notre travail on s'intéresse à la modélisation de Park à cause de sa simplicité. Cette dernière est établie à partir des équations électriques de la machine.

10.1. Modèle effectif de la MADA:

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor. Elle peut être schématisée par la figure.

Les phases sont désignées par a, b, c pour le stator et A, B, C pour le rotor. L'angle électrique θ définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statoriques et rotoriques.

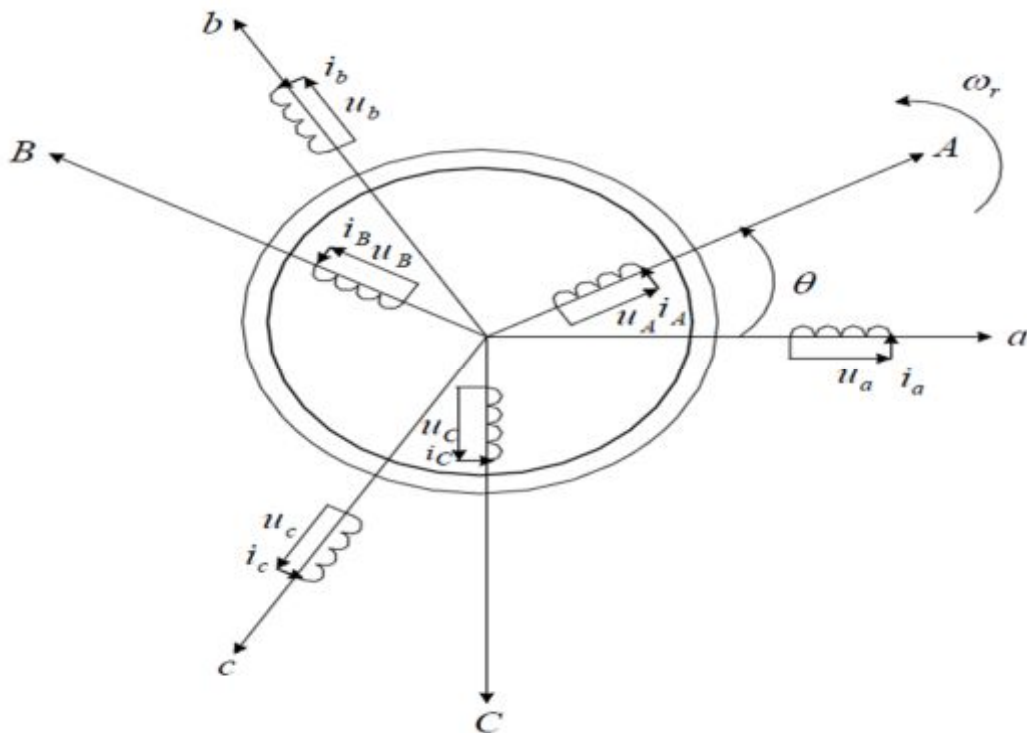


Figure II-10 : Représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation

10.2. Equations électrique de la MADA:

Les enroulements illustrés par la *Figure II-10* obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$[u_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (II.3)$$

$$[u_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + \frac{d[\varphi_{ABC}]}{dt} \quad (II.4)$$

Ou :

R_s : est la résistance d'une phase statorique.

R_r : est la résistance d'une phase rotorique.

Les matrices suivantes représentent respectivement :

✚ Les vecteurs statoriques :

$[u_{abc}] = [u_a u_b u_c]^t$: Le vecteur des tensions statoriques.

$[i_{abc}] = [i_a i_b i_c]^t$: Le vecteur des courants statoriques.

$[\varphi_{abc}] = [\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^t$: Le vecteur des flux statoriques.

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques :

$[u_{ABC}] = [u_A u_B u_C]^t$: Le vecteur des tensions rotoriques.

$[i_{ABC}] = [i_A i_B i_C]^t$: Le vecteur des courants rotoriques.

$[\varphi_{ABC}] = [\varphi_A \varphi_B \varphi_C]^t$: Le vecteur des flux rotoriques.

Les équations des flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques, sont données par les expressions suivantes :

➤ Pour le stator :

$$[\varphi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{ABC}] \quad (II.5)$$

➤ Pour le rotor :

$$[\varphi_{ABC}] = [L_r][i_{ABC}] + [L_{sr}]^t[i_{abc}] \quad (II.6)$$

Où : $[L_s]$ est la matrice des inductances statoriques, elle est donnée par :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix}$$

$[L_r]$ Est la matrice des inductances statoriques, elle est donnée par :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AA} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AA} \end{bmatrix}$$

Et : $[L_{sr}] = [L_{sr}]^t$ est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor, elle est donnée par :

$$[L_{sr}] = [L_{sr}]^t = L_{aa} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec :

L_{aa} : C'est l'inductance propre d'une phase statorique

L_{ab} : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques

L_{AA} : C'est l'inductance propre d'une phase rotorique

L_{AB} : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques

L_{aA} : C'est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique

En introduisant les équations (II. 5) et (II. 6) dans les équations (II. 3) et (II. 4) respectivement, on obtient :

$$[u_{abc}] = R_s [i_{abc}] + [L_s] \frac{d[i_{abc}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}][i_{ABC}])}{dt} \quad (II. 7)$$

$$[u_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + [L_r] \frac{d[i_{ABC}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}]^t [i_{abc}])}{dt} \quad (II. 8)$$

La dernière relation importante complétant le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, est l'équation fondamentale mécanique décrivant la dynamique du rotor. Cette équation est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + f_r \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (II. 9)$$

Ou :

J : est le moment d'inertie du rotor de la machine en $(kg.m^2)$

Ω_r : est la vitesse angulaire mécanique du rotor en (rd/s)

Avec :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{P}$$

Tel que :

P : est le nombre de paires de pôles

ω_r : est la vitesse angulaire électrique de rotation du rotor

f_r : est le coefficient de frottement en $(N.m.s/rd)$

C_{em} : est le couple électromagnétique en $(N.m)$

C_r : est le couple résistant en $(N.m)$.

Le modèle réel de la machine asynchrone à double alimentation est composé d'un ensemble d'équations différentielles ordinaires à coefficients variables en fonction de l'angle de rotation θ (voir la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor). On utilise la transformation de Park qui

permet d'obtenir un système d'équations à coefficients constants, en transformant les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents.

10.3. Application de la transformation de Park à la MADA:

La transformation de Park consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c , en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes d, q créant la même force magnétomotrice. La composante homopolaire intervient pour équilibrer le système transformé, c'est-à-dire, elle ne participe pas à la création de cette fmm de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d, q) . La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Ceci conduit à la conservation de puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles, et permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé, qui reste invariable pour la machine réelle [9]. Le schéma de la figure montre le principe de la transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à double alimentation.

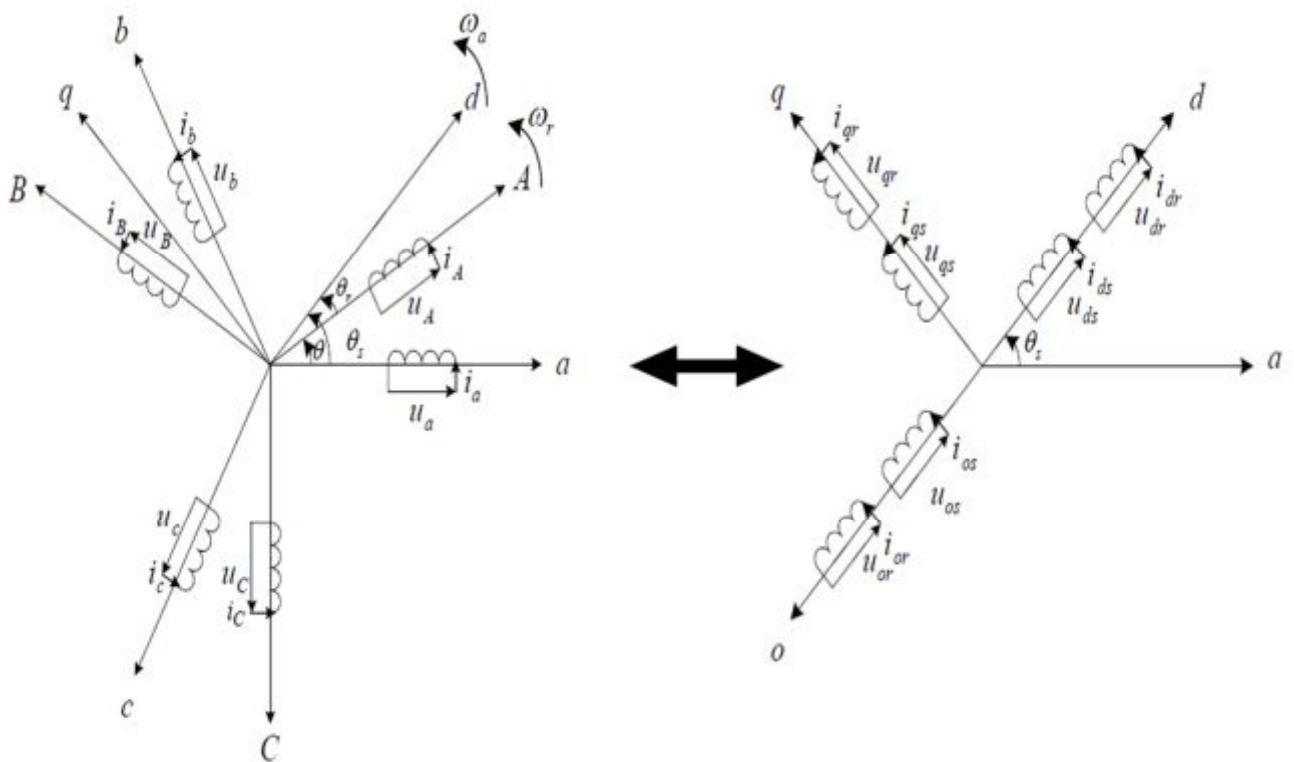


Figure II-11 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA

Ou :

θ : Est l'angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique A, et l'axe de Park direct d

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique a, et l'axe de Park direct d

ω_a :est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q)

ω_r :est la vitesse angulaire électrique rotorique.

Grâce à cette transformation, on définit une matrice unique appelée matrice de Park donnée par :

$$[A] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\psi & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\psi & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

Les grandeurs statoriques et rotoriques dans le repère de Park sont exprimées en utilisant les deux transformations suivantes :

➤ Pour le stator :

$$[X_{dqo}]_s = [A_s][X_{abc}] \quad (II. 10)$$

➤ Pour le rotor :

$$[X_{dqo}]_r = [A_r][X_{ABC}] \quad (II. 11)$$

Telle que X est une grandeur qui peut être une tension \mathbf{u} , un courant \mathbf{i} , ou un flux $\boldsymbol{\varphi}$.

Avec :

$$[A_s] = [A(\psi = \theta_s)] \text{ et } [A_r] = [A(\psi = \theta_r)]$$

10.4. Mise en équation de la MADA dans le repère de Park :

Dans le repère de Park, on a les transformations suivantes :

➤ Pour les tensions :

$$[u_{dqo}]_s = [A_s][u_{abc}] \quad (II. 12)$$

$$[u_{dqo}]_r = [A_r][u_{ABC}] \quad (II. 13)$$

➤ Pour les courants :

$$[i_{dqo}]_s = [A_s][i_{abc}] \quad (II. 14)$$

$$[i_{dqo}]_r = [A_r][i_{ABC}] \quad (II. 15)$$

➤ Pour les flux :

$$[\varphi_{dqo}]_s = [A_s][\varphi_{abc}] \quad (II. 16)$$

$$[\varphi_{dqo}]_r = [A_r][\varphi_{ABC}] \quad (II. 17)$$

10.4.1. Equations des tensions :

Pour le stator on a :

$$[u_{abc}] = R_s[i_{abc}] + \frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (II. 18)$$

En multipliant l'équation (II. 18) par la matrice $[A_s]$ il vient :

$$[A_s][u_{abc}] = R_s[A_s][i_{abc}] + [A_s]\frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (II. 19)$$

Alors :

$$[u_{dqo}] = R_s[i_{dqo}] + [A_s]\frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (II. 20)$$

Le développement de l'équation (II. 20) donne :

$$\begin{aligned} u_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_a \varphi_{qs} \\ u_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_a \varphi_{ds} \\ u_{os} &= R_s i_{os} + \frac{d\varphi_{os}}{dt} \end{aligned} \quad (II. 21)$$

Ou : $\omega_a = \frac{d\theta_s}{dt}$ est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q).

En procédant d'une façon analogue à celle du stator, on trouve pour le rotor :

$$\begin{aligned} u_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \varphi_{qr} \\ u_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) \varphi_{dr} \\ u_{or} &= R_r i_{or} + \frac{d\varphi_{or}}{dt} \end{aligned} \quad (II. 22)$$

10.4.2. Equations des flux :

Pour le stator en multipliant l'équation (II. 5) par $[A_s]$ on trouve :

$$[A_s][\varphi_{abc}] = [A_s][L_s][i_{abc}] + [A_s][L_{sr}][i_{ABC}] \quad (II. 23)$$

Donc :

$$[\varphi_{dqo}] = [A_s][L_s][i_{abc}] + [A_s][L_{sr}][i_{ABC}] \quad (II. 24)$$

Après la simplification, on trouve :

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} &= L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{os} &= L_s i_{os} \end{aligned} \quad (II. 25)$$

Pour le rotor, et de la même manière, on trouve :

$$\begin{aligned}\varphi_{dr} &= L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} &= L_r i_{qr} + M i_{qs} \\ \varphi_{or} &= L_r i_{or}\end{aligned}\quad (II.26)$$

Avec :

$L_s = L_{aa} - L_{ab}$:est l'inductance cyclique statorique

$L_{os} = L_{aa} + 2L_{ab}$:est l'inductance homopolaire statorique

$M = \frac{3}{2}L_{aA}$:est l'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor

$L_r = L_{AA} - L_{AB}$:est l'inductance cyclique rotorique

$L_{or} = L_{AA} + 2L_{AB}$:est l'inductance homopolaire rotorique

Jusqu'à maintenant, le modèle de Park n'est pas complètement défini, puisque la vitesse de rotation ω_a du repère (d, q) par rapport au stator est quelconque. Les équations des tensions sont affectées, par le choix du référentiel, c'est-à-dire de la vitesse de rotation ω_a .

10.4.3. Choix du référentiel :

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique [5]:

🚩 Référentiel lié au stator :

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (α, β) . Dans ce cas, $(\omega_a = \mathbf{0})$. Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques [9].

🚩 Référentiel lié au rotor :

Dans ce cas, le système d'axes (d, q) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse $(\omega_a = \omega_r)$. Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor [9]

🚩 Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X, Y) , il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire $(\omega_a = \omega_s)$.

10.4.4. Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park :

Pour étudier les phénomènes transitoires (démarrage, freinage, variation de la charge) avec une vitesse rotorique variable, il faut ajouter l'équation du mouvement au système d'équations différentielles modélisant la machine [26]. La forme générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone triphasée modélisée dans le repère de Park est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3PM}{2L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) = \frac{3P}{2} (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (II.27)$$

10.5. Modèle de la MADA dans le repère de Park sous forme d'état :

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park qui peut être mis sous la forme d'état suivante :

$$\begin{aligned} \frac{di_{ds}}{dt} &= \frac{1}{L_s \sigma} \left(u_{ds} - R_s i_{ds} + \frac{MR_r}{L_r} i_{dr} + (\omega_s \sigma - P \Omega_r (\sigma - 1)) L_s i_{qs} - \frac{M}{L_r} u_{dr} + P \Omega_r M i_{qr} \right) \\ \frac{di_{qs}}{dt} &= \frac{1}{L_s \sigma} \left(u_{qs} - R_s i_{qs} + \frac{MR_r}{L_r} i_{qr} + (\omega_s \sigma - P \Omega_r (\sigma - 1)) L_s i_{ds} - \frac{M}{L_r} u_{qr} + P \Omega_r M i_{dr} \right) \\ \frac{di_{dr}}{dt} &= \frac{1}{L_r \sigma} \left(u_{dr} - R_r i_{dr} + \frac{MR_s}{L_s} i_{ds} + \frac{\sigma-1}{M} P \Omega_r L_s L_r i_{qs} - \frac{M}{L_s} u_{ds} + \frac{\omega_s \sigma - P \Omega_r}{L_s} i_{qr} \right) \\ \frac{di_{qr}}{dt} &= \frac{1}{L_r \sigma} \left(u_{qr} - R_r i_{qr} + \frac{MR_s}{L_s} i_{qs} - (\omega_s \sigma + P \Omega_r) L_r i_{dr} - \frac{M}{L_s} u_{qs} - P \Omega_r M i_{ds} \right) \\ \frac{d\Omega_r}{dt} &= \frac{3PM}{2J} (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) - \frac{C_r}{J} - \frac{f_r}{J} \Omega_r \end{aligned} \quad (II.28)$$

Où : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ est le coefficient de dispersion de blondel.

11. Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter la structure d'une machine asynchrone à double alimentation en comparaison avec les machines classiques de type synchrone ou asynchrone à cage où nous avons effectué une présentation des différentes configurations de la machine asynchrone à double alimentation.

Afin de mieux comprendre les avantages que peut présenter cette machine par rapport aux structures classiques.

Pour simplifier le modèle de la machine nous avons par la suite, établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (d, q) lié au stator à l'aide de la transformation de PARK.

Nous avons analysé les avantages et les inconvénients de l'utilisation des convertisseurs statiques pour l'alimentation de la MADA, deux configurations sont proposées, une où la machine est alimentée par un convertisseur au rotor alors que le stator est lié au réseau (fonctionnement en générateur pour une application du type éolien), c'est cette configuration qui nous intéresse, l'autre où la machine est alimentée par deux convertisseurs, l'un au stator et l'autre au rotor et dédiée à des applications industrielles telles le laminage ou le pompage (fonctionnement moteur).

Chapitre III

Modélisation d'alimentation

De la MADA

1. Introduction :

Après avoir étudié la machine asynchrone a double alimentation a rotor bobiné dans le chapitre précédent il suffit maintenant de trouver la structure de commande pour la chaîne de conversion.

Pour la structure de commande, il faut intégrer un onduleur de tension au niveau des bobines de rotor, ce dernier qui est contrôlé par une technique de modulation de large impulsion (MLI) permet le réglage simultanément de la fréquence et la tension. Donc on doit utiliser la commande de la MADA par un seul onduleur (chapitre II).

2. La chaîne de conversion :

Le fonctionnement avec convertisseur statique est effectué en utilisant un seul convertisseur au rotor composé d'un redresseur à diodes, un filtre passe bas et d'un onduleur à IGBTs alors que le stator est relié directement à la source triphasé. La modulation par largeur d'impulsion (MLI) utilisée est régulière, triangulaire, symétrique.

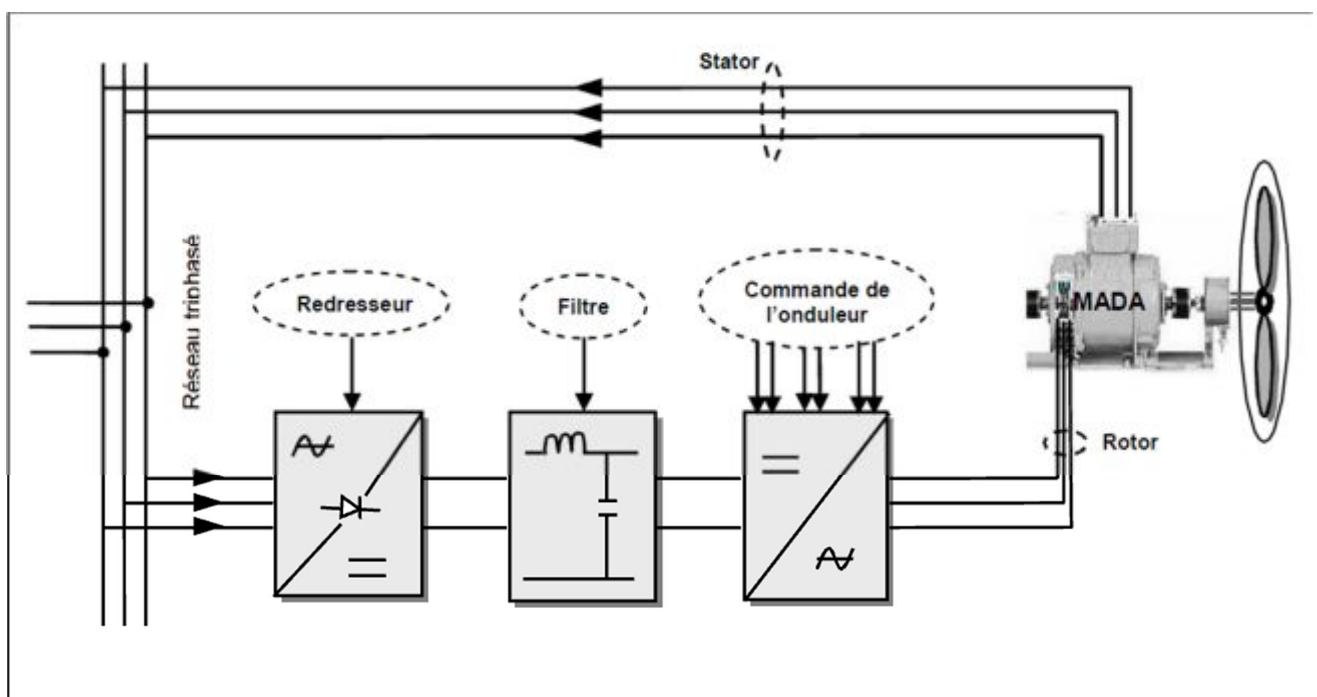


Figure III-1 : Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA

Les caractéristiques exigées de l'actionneur électrique dépendent à la fois de la machine, de son alimentation et de la commande des convertisseurs de fréquence.

Ces caractéristiques sont :

- ✓ Un couple avec le minimum d'ondulation possible, contrôlable par le plus petit nombre de variable, en régime dynamique comme en régime permanent.
- ✓ Une large plage de variation de vitesse.
- ✓ Des constantes de temps électriques et mécanique faibles.
- ✓ La source d'alimentation triphasée est supposée symétrique, de fréquence et d'amplitude constante

2.1. Modélisation du redresseur triphasé à diodes :

Le redresseur utilisé est un redresseur triphasé double alternance à diodes. La figure représente son schéma de principe, il est composé de trois diodes D_1, D_2, D_3 à cathode commune chacune conduit lorsque le potentiel de son anode est le plus positif, et de trois diodes D_4, D_5, D_6 à anode commune, chacune conduit lorsque le potentiel de sa cathode est le plus négatif assurant ainsi le retour de courant $i_d(t)$.

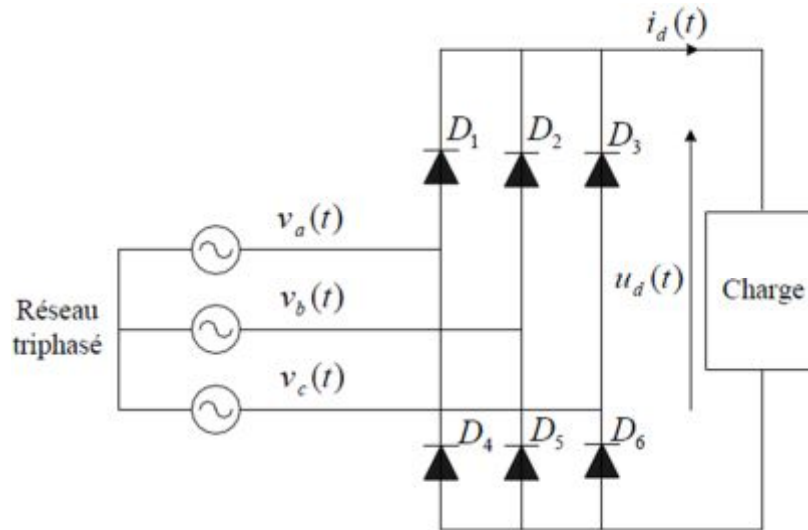


Figure III-2 : Représentation du redresseur triphasé à diodes

Le redresseur est alimenté par un système de tension triphasé exprimé par :

$$\begin{aligned} v_a(t) &= v_m \sin(2\pi ft) \\ v_b(t) &= v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_c(t) &= v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{III. 1})$$

La valeur instantanée de la tension redressée est donnée par :

$$u_d(t) = \text{Max}(v_a(t), v_b(t), v_c(t)) - \text{Min}(v_a(t), v_b(t), v_c(t)) \quad (\text{III. 2})$$

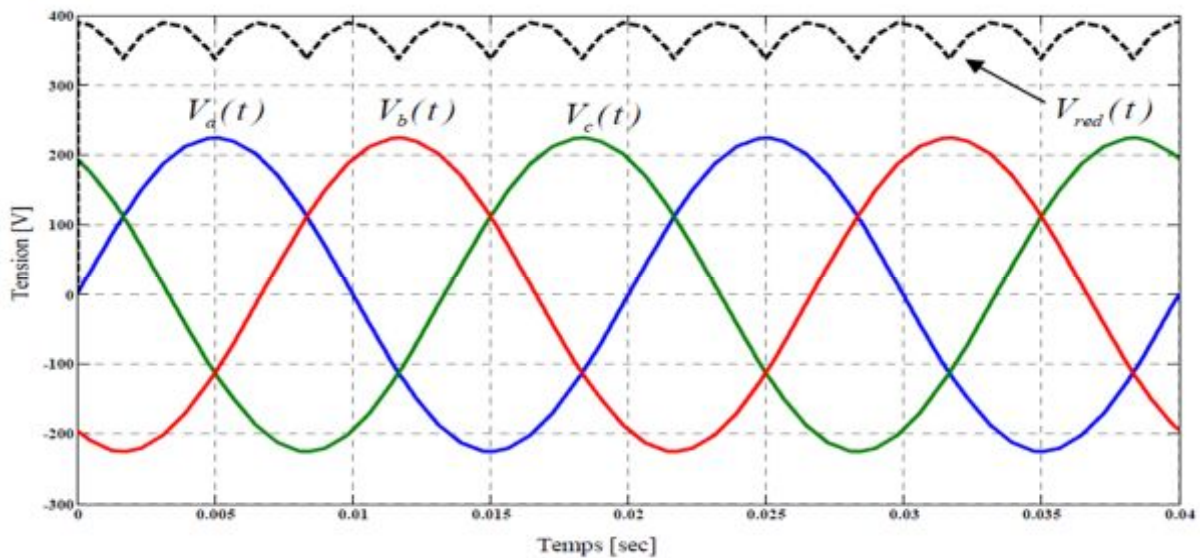


Figure III-3 : Représentation de la tension de sortie du redresseur

La tension redressée présente un taux d'ondulations. Pour réduire ces ondulations il faut placer un filtre passe bas entre le redresseur et l'onduleur.

2.2. Modélisation du filtre :

Le rôle de ce circuit est de réduire le taux d'ondulations de la tension redressée. La **Figure III-4** représente son schéma de principe.

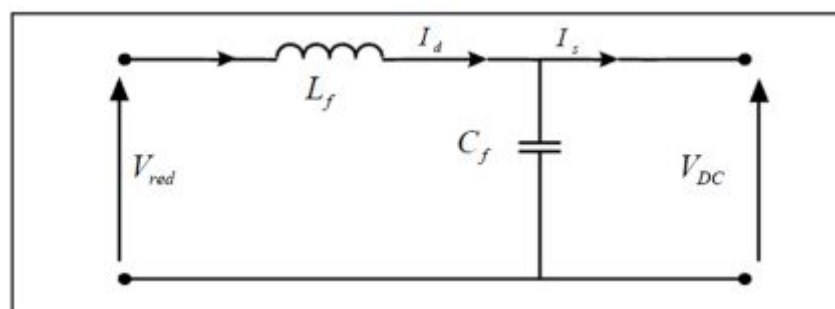


Figure III-4 : Représentation du filtre passe-bas

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivantes :

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{V_{red} - V_{DC}}{L_f} \quad (III. 3)$$

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{I_d - I_s}{C_f} \quad (III. 4)$$

Calcul des paramètres du filtre :

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(p) = \frac{V_{DC}(p)}{V_{red}(p)} = \frac{1}{L_f C_f p^2 + 1} \quad (III. 5)$$

Ou p est l'opérateur de LAPLACE.

Cette fonction de transfert est de deuxième ordre dont la fréquence de coupure est :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$$

Pour la simulation on prend les valeurs de filtre LC suivant

$$L_f = 400\text{mH} \quad , \quad C_f = 600 \mu\text{F}$$

2.3. Modélisation de l'onduleur triphasé :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistor ou thyristor GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau. Après redressement, la tension filtrée V_{DC} est appliquée à l'onduleur. Il est le cœur de l'organe de commande de la MADA et peut être considéré comme un amplificateur de puissance.

Le schéma structurel d'onduleur triphasé à deux niveaux est illustré par La **Figure IV-5**. Chaque transistor-diode assemblée en parallèle.

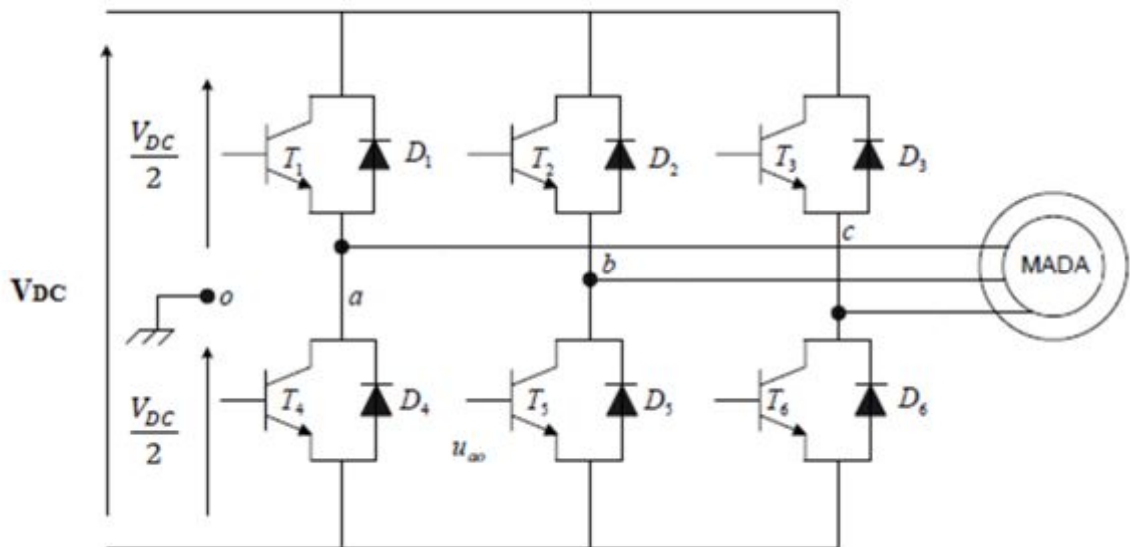


Figure III-5 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une MADA

Les trois tensions composées V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « o ».

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} &= V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} &= V_{co} - V_{ao} \end{aligned} \quad (\text{III. 6})$$

Soit n le point neutre du côté de la MADA, alors on peut écrire :

$$\begin{aligned} V_{ao} &= V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} &= V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} &= V_{cn} + V_{no} \end{aligned} \quad (III. 7)$$

Et comme le système est supposé en équilibre, c'est-à-dire :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (III. 8)$$

Alors :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (III. 9)$$

On obtient finalement les expressions des tensions simples de la machine :

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_b &= \frac{1}{3}(2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_c &= \frac{1}{3}(2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{aligned} \quad (III. 10)$$

2.3.1. Modulation de largeur d'impulsion (MLI):

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec le porteuse (tension à haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

Les techniques de modulations sont nombreuses, les plus utilisées sont ; la naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis.

L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement.

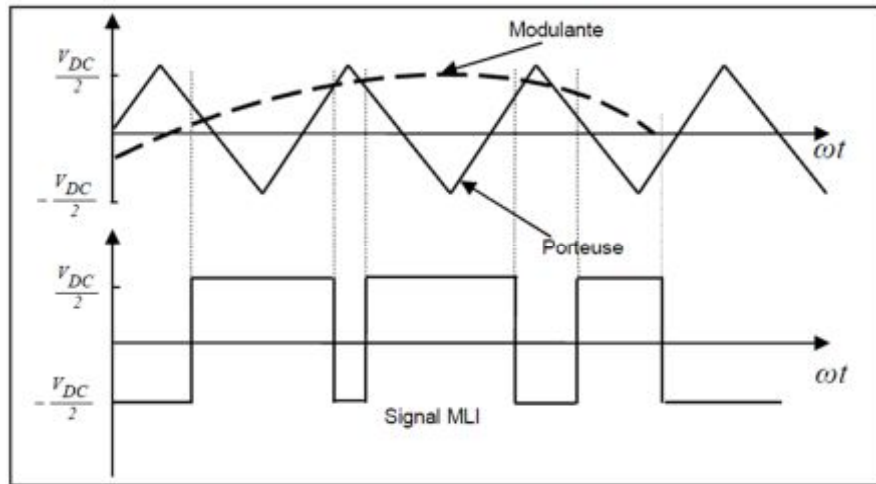


Figure IV-6 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire

3. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté une modélisation de système d'alimentation qui comporte le redresseur, le filtre et l'onduleur. Pour ce dernier, on a appliqué la technique de la MLI pour le commander. A partir de cette chaine de conversion et les équations de la MADA on réalise notre chaine de conversion sous forme de bloc sous MATLAB/SIMULINK qui suit dans le dernier chapitre avec leurs résultats de simulation.

Chapitre IV

Simulation de la Génératrice

Eolienne

1. Introduction :

Après ce long chemin pour atteindre une chaîne de conversion sous bloc au MATLAB/SIMULINK il suffit maintenant de faire une simulation de cette conversion avec ces données et de trouver les résultats avec leur interprétation.

2. Présentation globale de la chaîne de conversion de l'éolienne basée sur la MADA sous MATLAB :

Le schéma bloc global du système étudié sous MATLAB/SIMULINK est donné (voir annexe 1)

La turbine éolienne couplé avec la machine asynchrone à double alimentation (MADA) ; le stator de la machine est connecté directement au réseau triphasé, le rotor alimenté par un onduleur triphasé à deux niveaux commandé par MLI.

Les résultats de simulation de la génératrice éolienne qu'on doit le voir on a prend des valeurs moyenne fixe de trois catégorie vent au lieu de prendre une valeur variable de vent.

Pour ces résultats on prend les paramètres de système éolien suivant :

$R = 35.25 \text{ m}$, $G = 90$, $R_s = 0.435\Omega$, $R_r = 0.816\Omega$, $L_s = 0.071\text{H}$, $L_r = 0.071\text{H}$, $M = 0.069\text{H}$, $P = 2$

✚ On commence notre simulation avec une vitesse de vent test de 16m/s de manière à montrer un résultat de simulation de la génératrice éolienne sous différents paramètres

✓ **Vitesse mécanique**

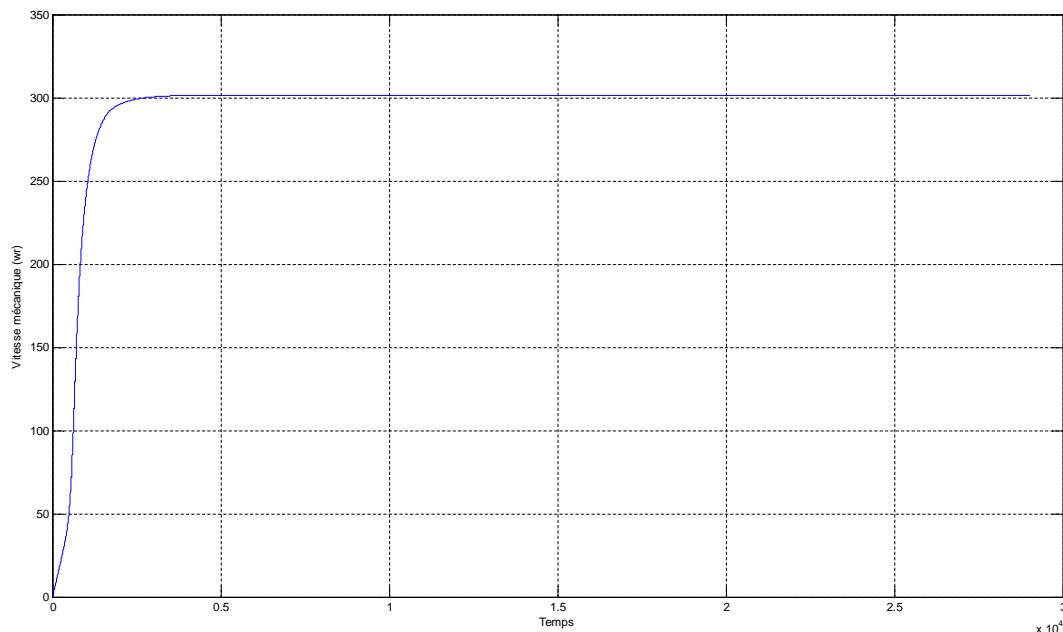


Figure IV-1 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique »

✓ **Couple électromagnétique**

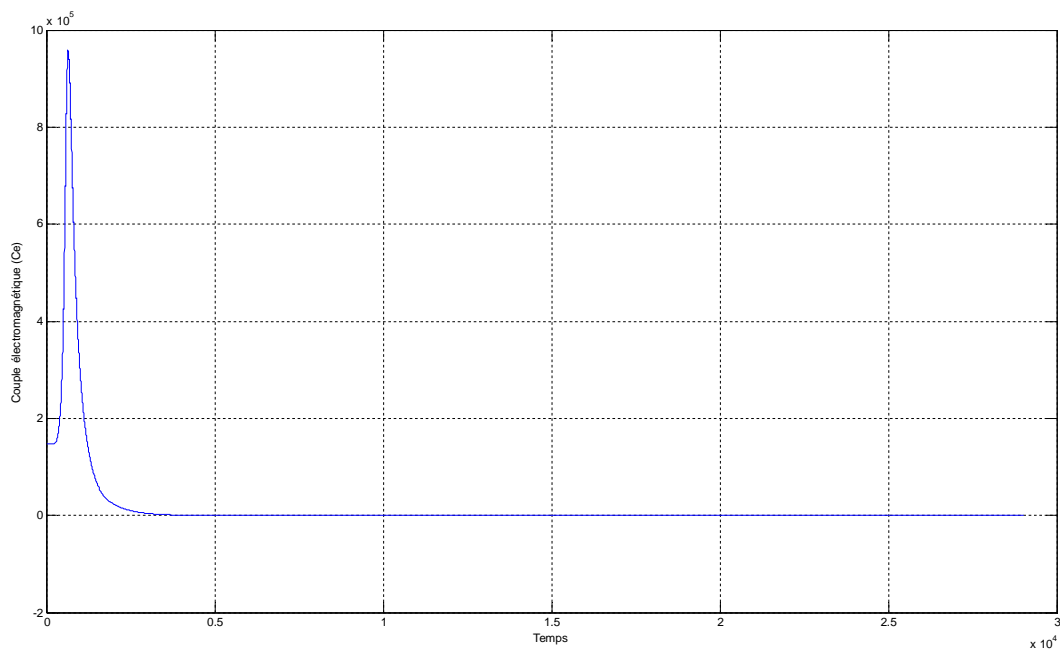


Figure IV-2 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique »

➤ Courant statorique

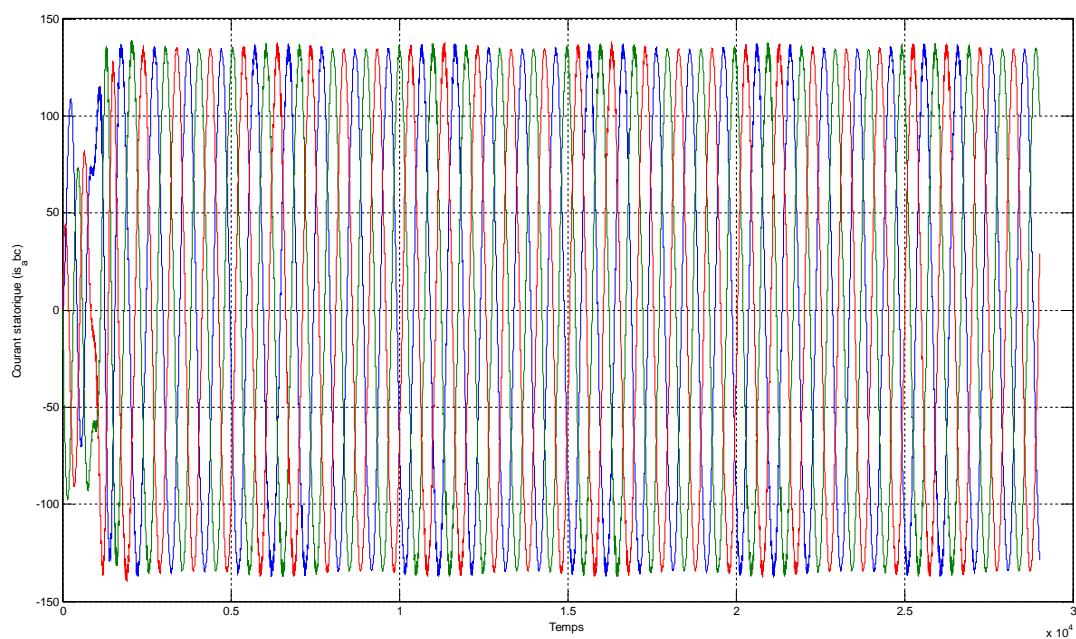


Figure IV-3 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique »

➤ Puissance active et réactive statorique

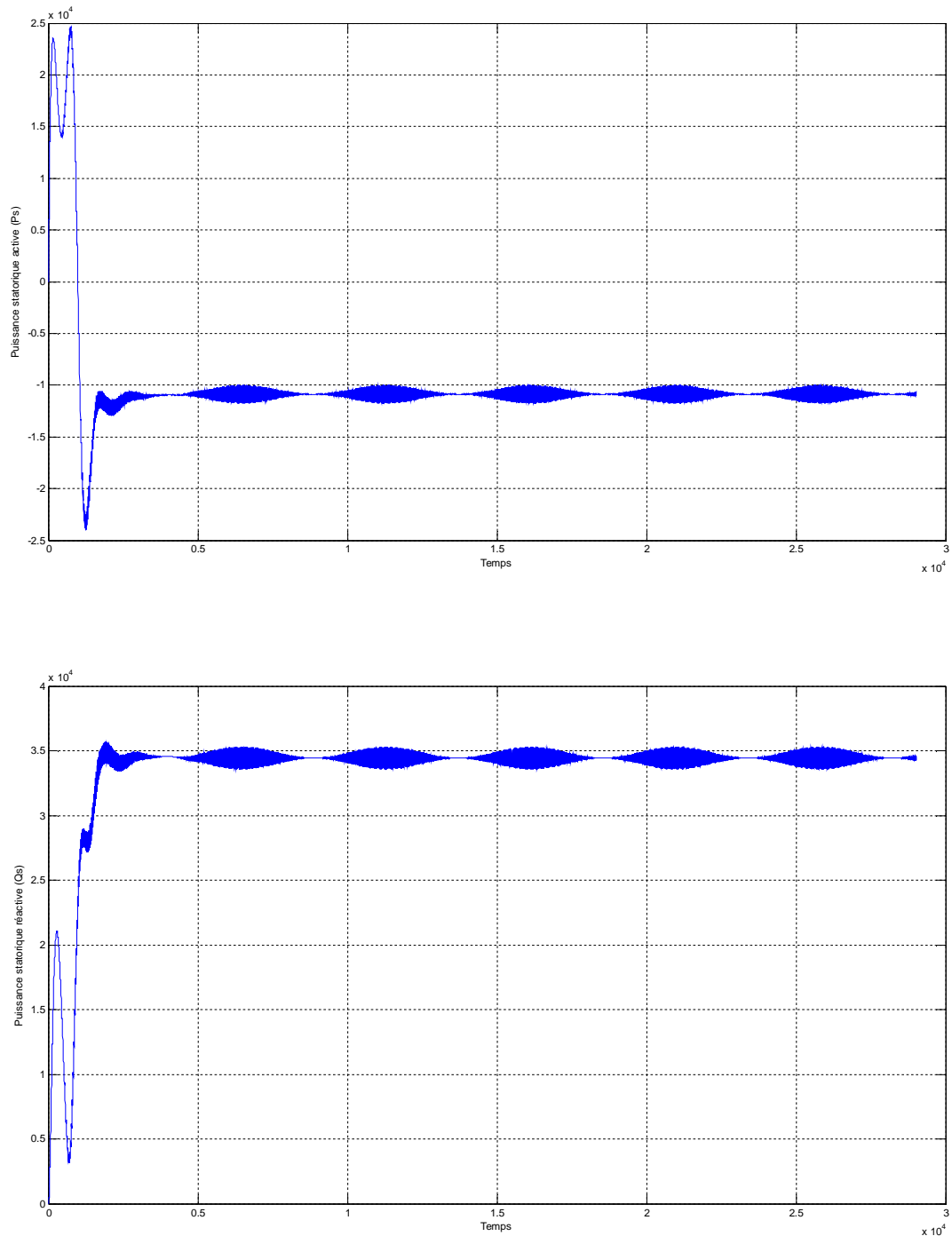


Figure IV-4 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive »

➤ **Interprétation**

Les résultats de simulation obtenus montrent bien la réponse dynamique rapide de la vitesse mécanique. Cette dernière atteint une valeur légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme ça dépend de plusieurs paramètres, principalement à la vitesse de vent, l'angle de calage.

Des fluctuations sont présentées au niveau des puissances dues à la technique MLI à cause des commutations des interrupteurs de l'onduleur.

Notons aussi que la machine génère plus de l'énergie réactive que l'énergie active pour cette vitesse de vent 16m/s.

- Suivant note thème étudier on doit prendre des vitesses de vent variable pour ce cas on va prendre une vitesse moyenne d'un vent faible, moyen et fort ou on va sortir des résultats et leur interprétation puis à la fin on sorte avec comparaison des résultats des différentes vitesses de vent en plus une conclusion sur les résultats.

2.1. Résultats de simulation pour une vitesse de vent 5 m/s

Dans ce premier cas on va prendre une vitesse moyenne de vent faible (5 m/s)

➤ Vitesse mécanique

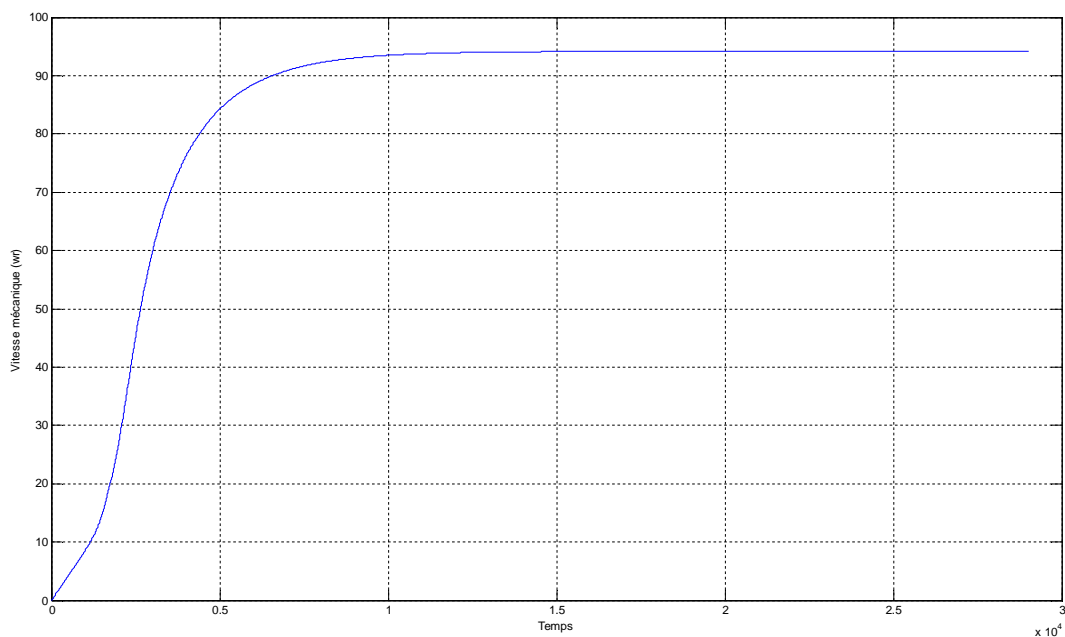


Figure IV-5 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique pour $V=5\text{m/s}$ »

➤ Couple électromagnétique

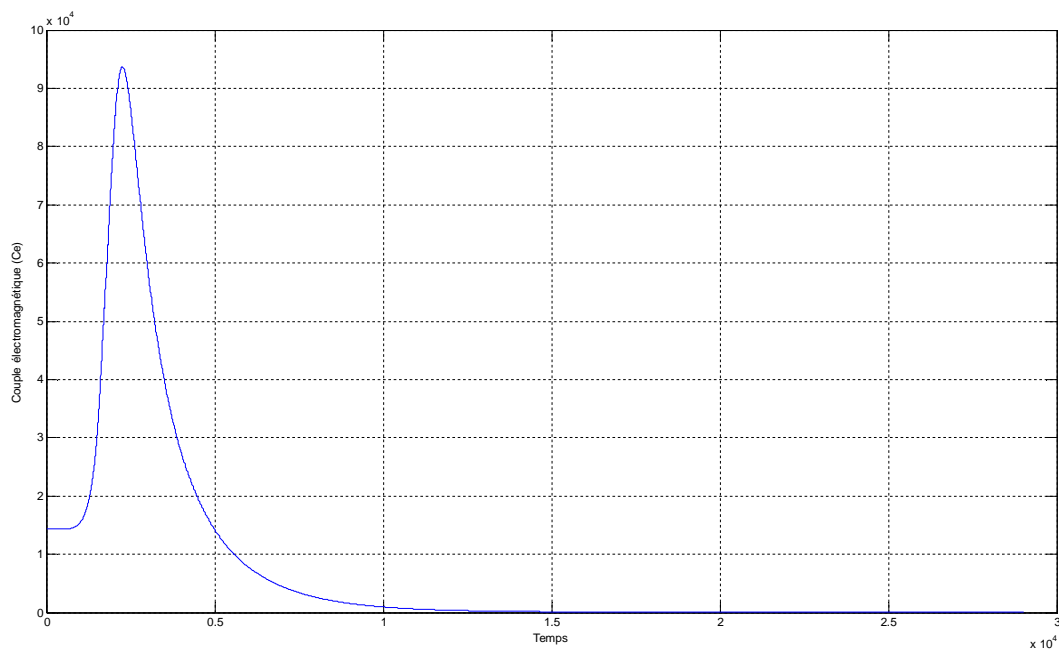


Figure IV-6 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour $V=5m/s$ »

➤ **Courant statorique**

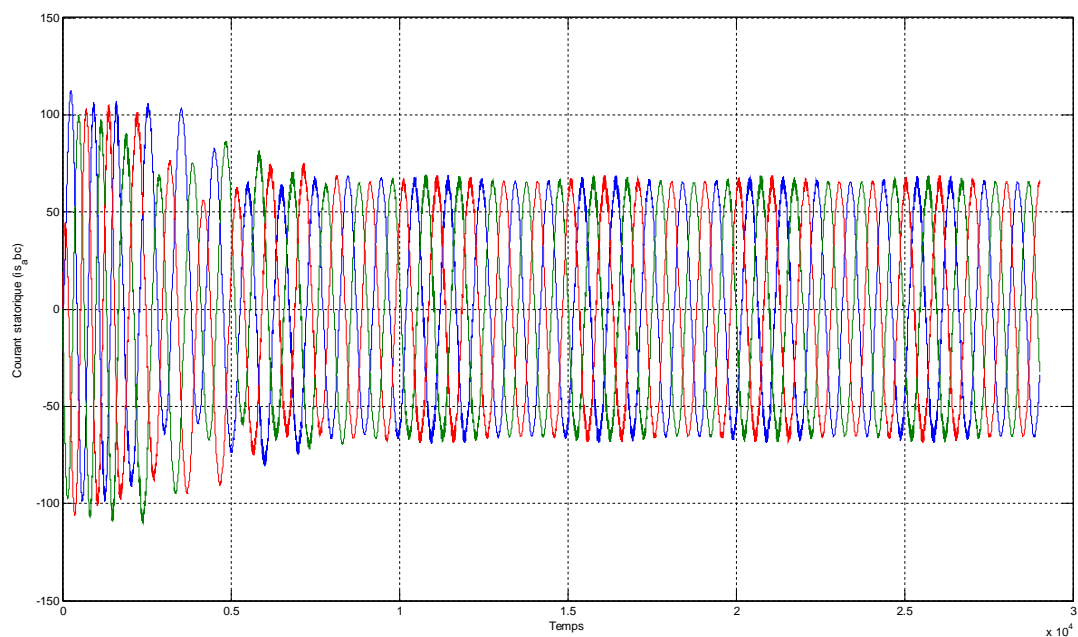


Figure IV-7 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour $V=5m/s$ »

➤ **Puissance active et réactive statorique**

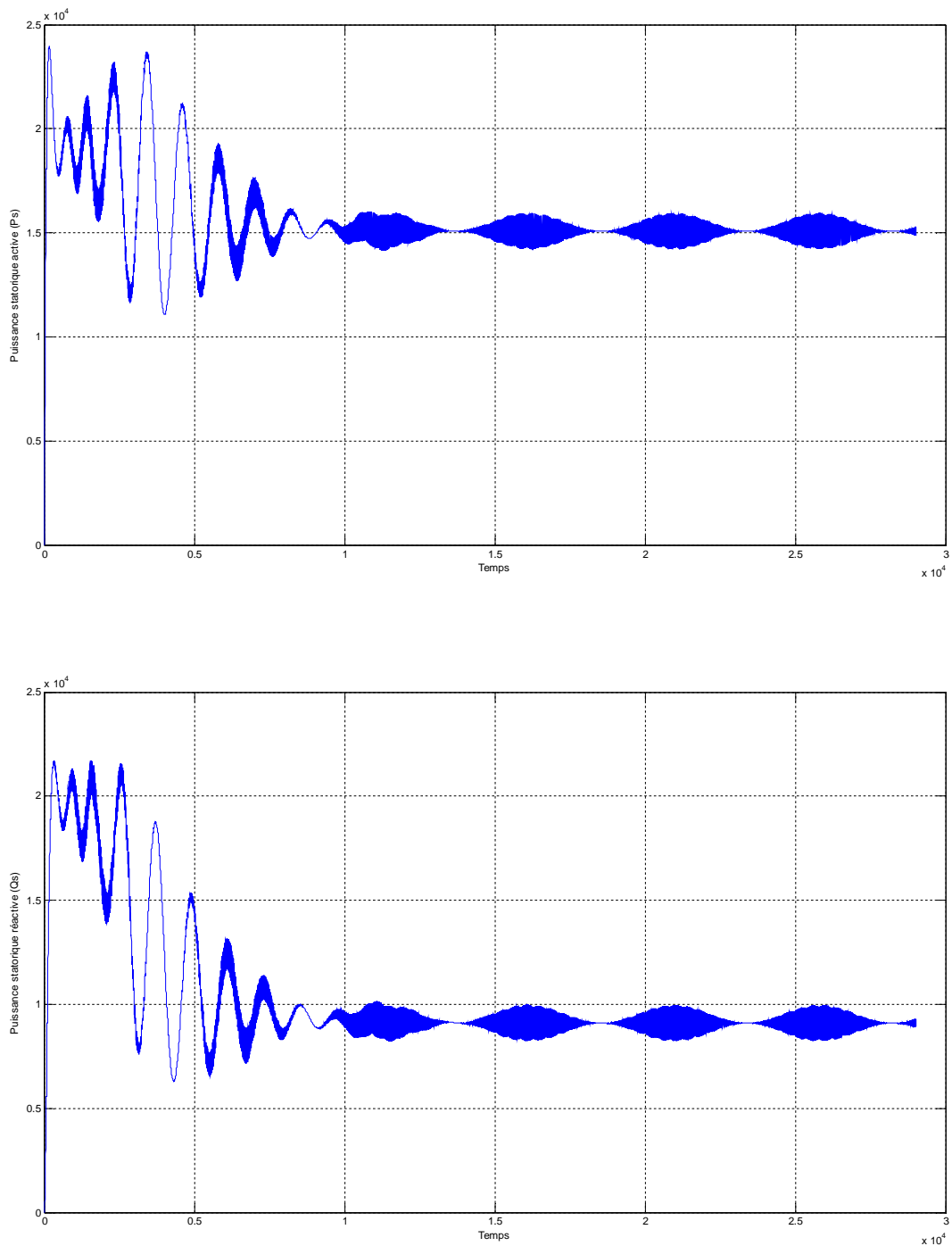


Figure IV-8 : de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive statorique pour $V=5\text{m/s}$ »

✓ **Interprétation**

Les résultats de simulation montre que la réponse dynamique de la vitesse mécanique est prend un temps de **0.044s** pour atteindre une vitesse maximal de **95.9rad/s**. on note aussi que la génératrice génère une puissance active plus que la puissance réactive pour cette vitesse de vent.

Dans ce cas on voit que la génératrice éolienne absorbe une puissance active qui présente le fonctionnement de la MADA comme moteur (l'énergie active absorber par la génératrice éolienne est avec un signe plus qui représente un fonctionnement de la MADA comme moteur)

2.2. Résultats de simulation pour une vitesse de vent 10 m/s

Dans ce deuxième cas on va prendre une vitesse moyenne de vent moyen (10 m/s)

➤ Vitesse mécanique

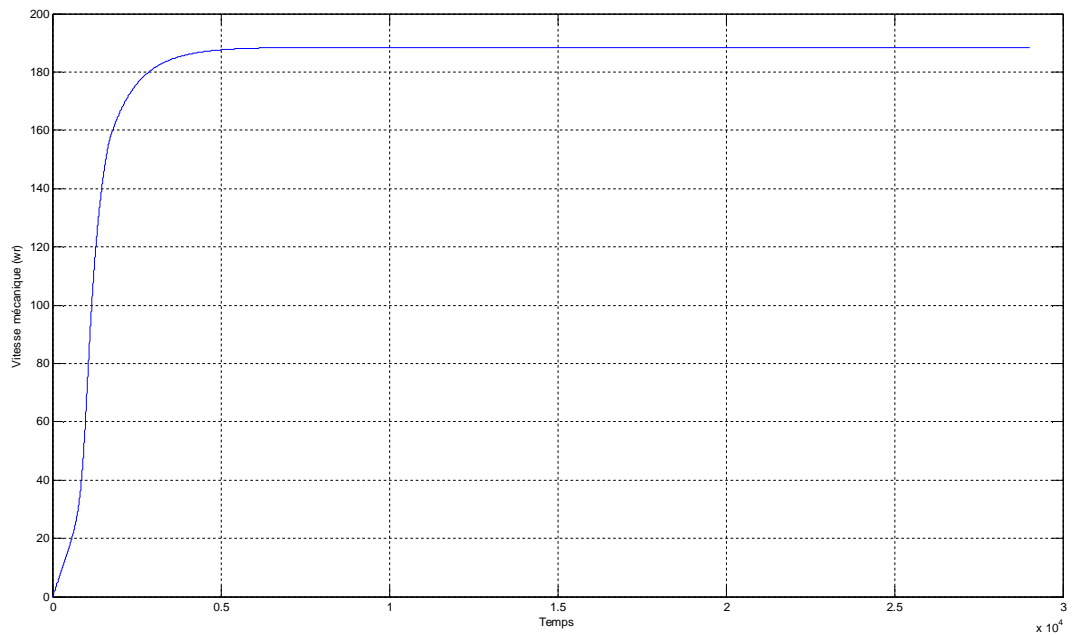


Figure IV-9 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse m mécanique pour $V=10m/s$ »

➤ Couple électromagnétique

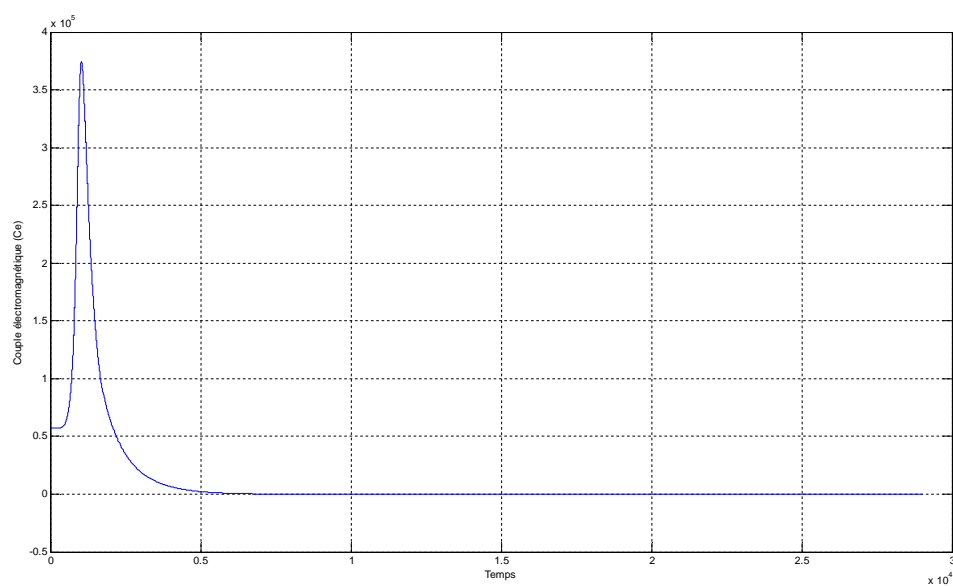


Figure IV-10 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour $V=10m/s$ »

➤ **Courant statorique**

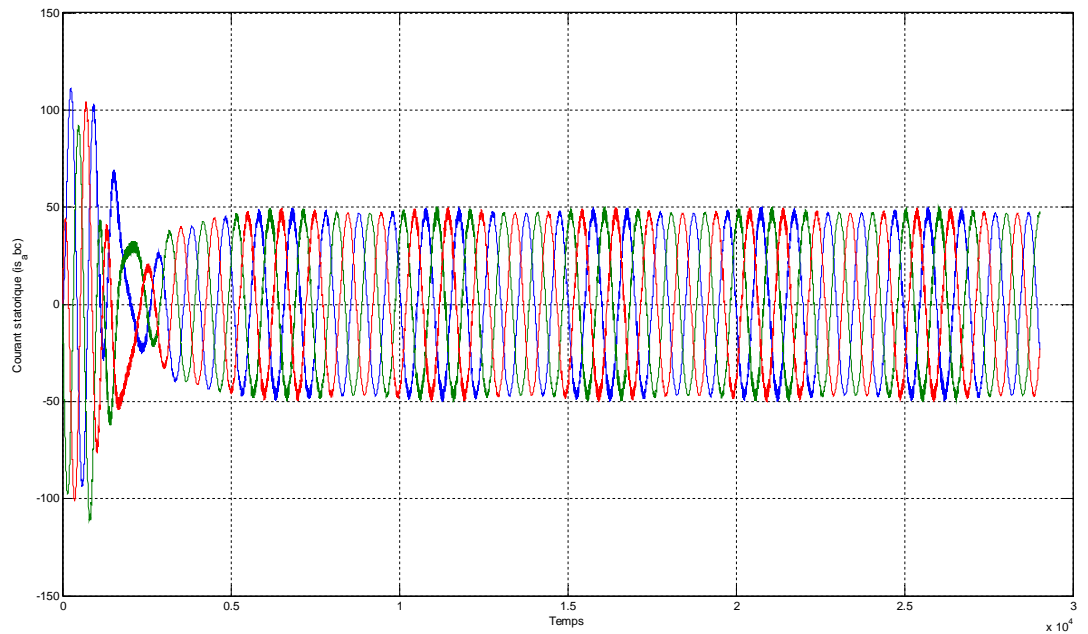
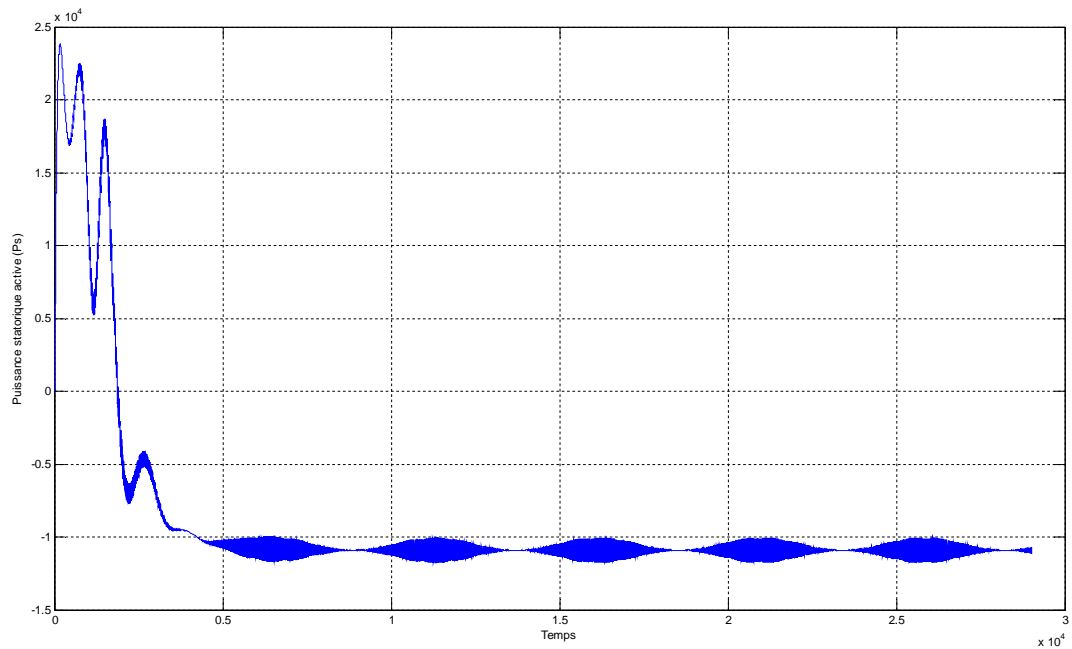


Figure IV-11 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour $V=10m/s$ »

➤ **Puissance active et réactive statorique**



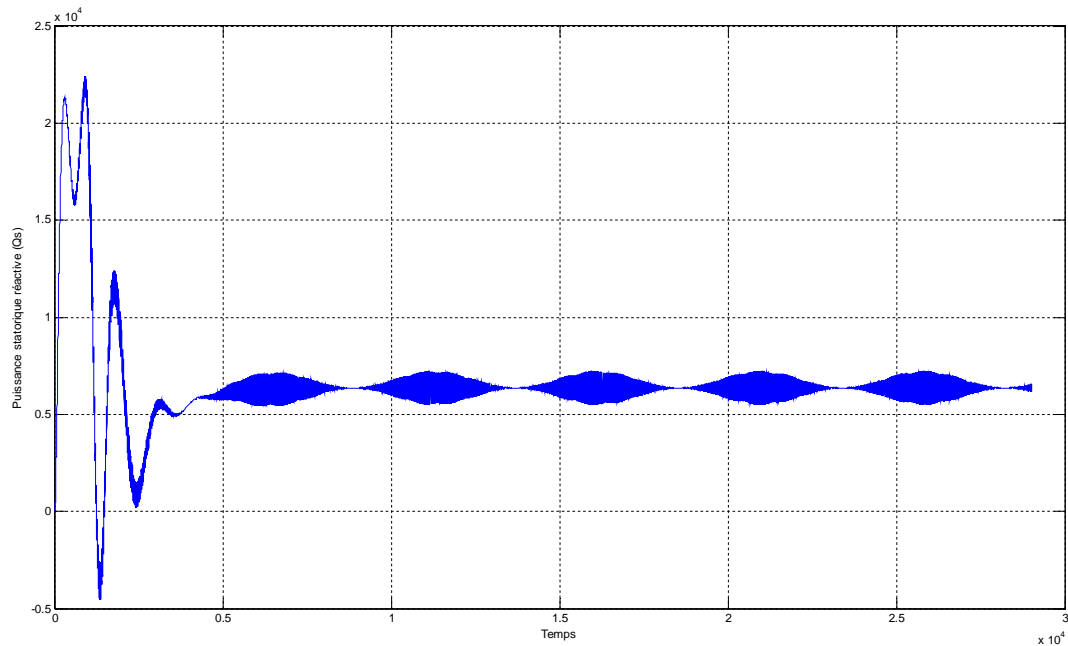


Figure IV-12 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive statorique pour $V=10\text{m/s}$ »

✓ *Interprétation*

Les résultats de simulation montre que la réponse dynamique de la vitesse mécanique est prend un temps de **0.021s** pour atteindre une vitesse maximal de **188.47rad/s**. on note aussi que la génératrice génère une puissance réactive plus que la puissance active pour cette vitesse de vent

Dans ce cas on voit que la génératrice éolienne génère une puissance active qui donne un fonctionnement de la MADA comme génératrice (l'énergie active générer est avec un signe moins présente le fonctionnement comme génératrice)

2.3. Résultats de simulation pour une vitesse de vent 20 m/s

Dans ce troisième cas on va prendre une vitesse moyenne de vent fort (20 m/s)

✓ Vitesse mécanique

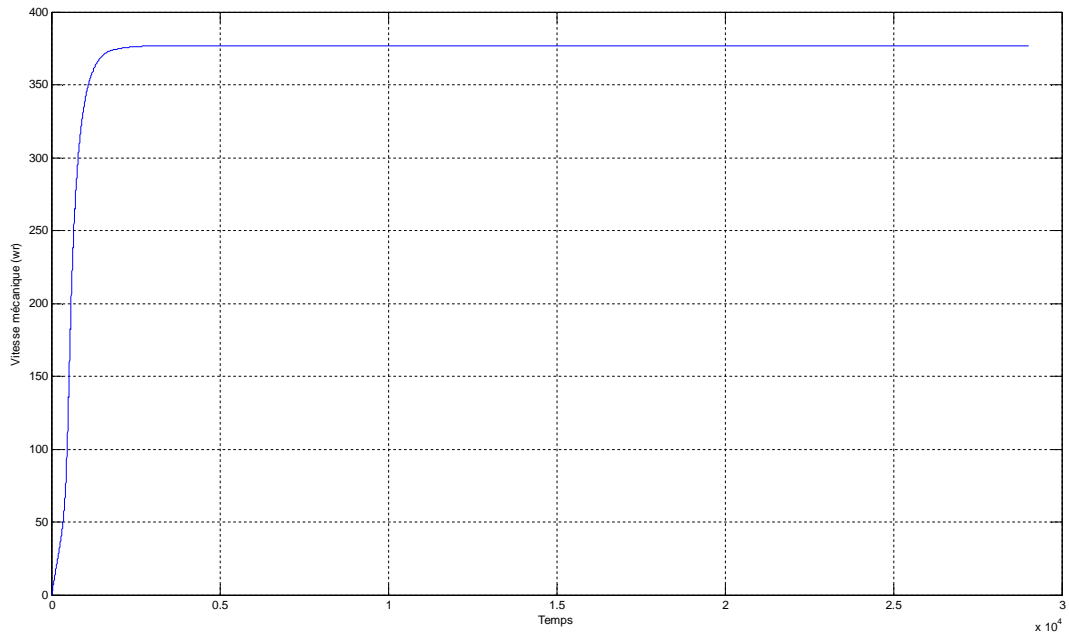


Figure IV-13 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique pour $V=20\text{m/s}$ »

✓ Couple électromagnétique

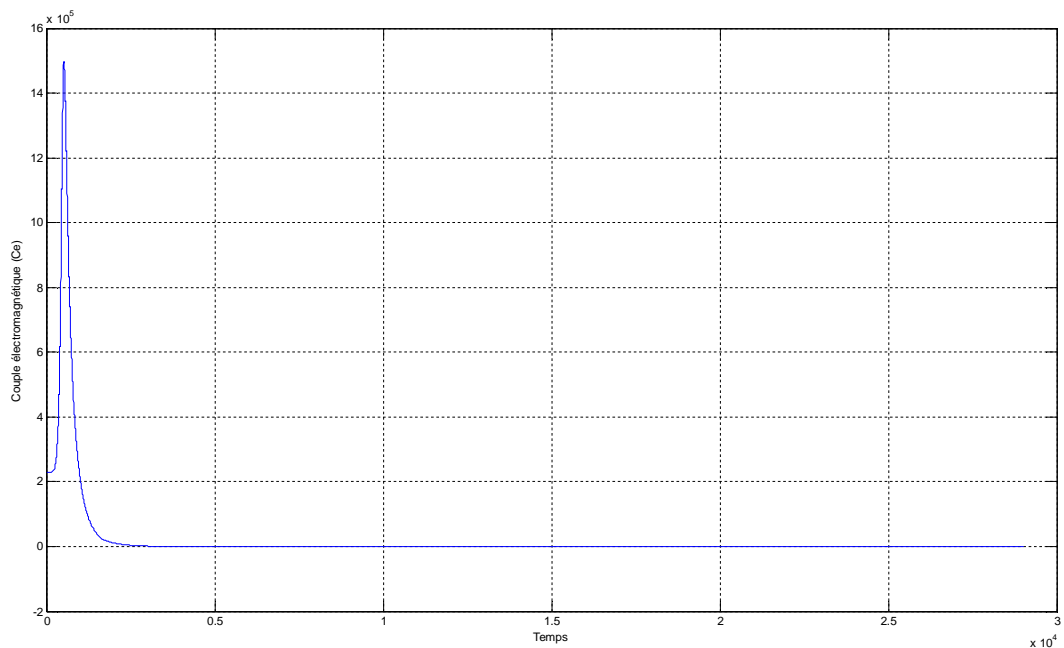


Figure IV-14 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour $V=20\text{m/s}$ »

✓ Courant statorique

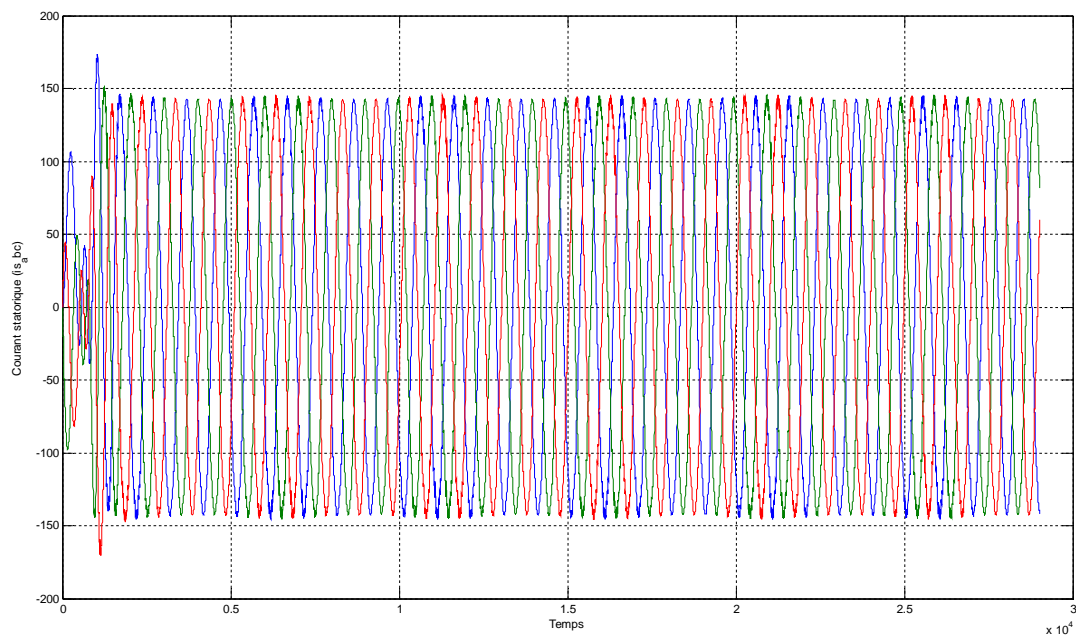
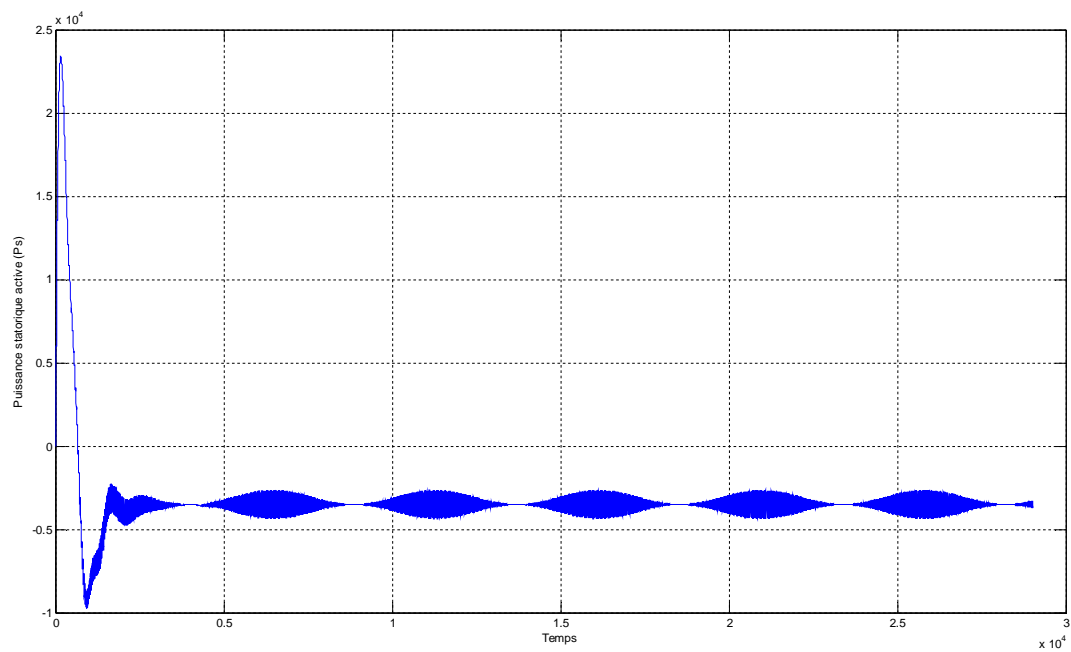


Figure IV-15 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour $V=20\text{m/s}$ »

✓ Puissance active et réactive



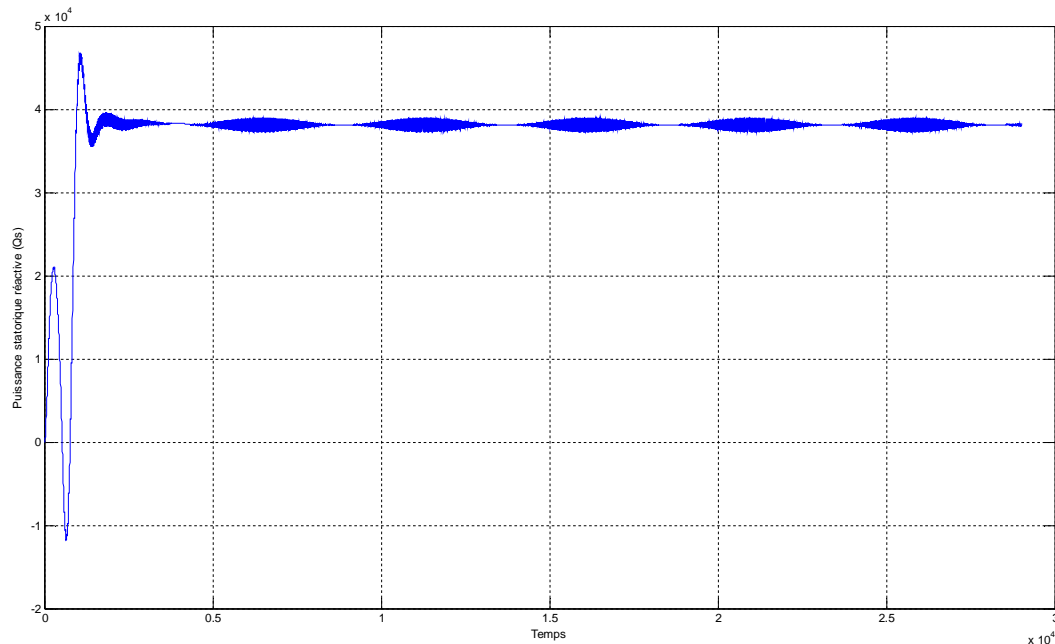


Figure IV-16 : résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive statorique pour $V=20\text{m/s}$ »

✓ interprétation

Les résultats de simulation montre que la réponse dynamique de la vitesse mécanique est prend un temps de **0.011s** pour atteindre une vitesse maximal de **376.91rad/s**. on note aussi que la génératrice génère une puissance réactive plus que la puissance active pour cette vitesse de vent

Dans ce cas aussi on le fonctionnement de la MADA comme génératrice

- ✚ par une comparaison entre les résultats de simulations pour ces vitesse on constate que :
 - Plus que la vitesse de vent est fort plus que la réponse dynamique de la vitesse mécanique est rapide.
 - La génératrice génère une puissance active à partir d'une vitesse de vent **8.3m/s** qui permet un fonctionnement de la MADA comme génératrice qui s'intéresse pour cette étude
 - Pour permettre une production d'électricité sur une large gamme de vitesse de vent il faut que l'éolienne soit équipée de dispositifs de réglage de l'incidence des pales. Ceci permet de produire une puissance constante quelque soit la force de vent, ce qui diminue les perturbations sur le réseau.(voir 6.2.4 au page 13)

3. Conclusion :

Dans ce chapitre on a simplifié les équations de la MADA et l'éolienne sur des blocs sous MATLAB/SIMULINK ou nous avons établi une simulation du système complet avec une alimentation externe de rotor puis une variation de vitesse de vent pour cette simulation ou on a constaté que la vitesse mécanique, le courant statorique et les puissances active et réactive sont change suivant la vitesse de vent.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce thèse a comme objectif d'étude en générale une éolienne a vitesse variable basée sur la machine asynchrone a double alimentation suivant la modélisation complète du la conversion éolienne.

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaine de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et dresse un état de l'art sur les différentes associations machines électriques – convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne. Au regard de ce chapitre, il est apparu que la production d'énergie électrique par éoliennes se devise en deux grandes catégories : l'éolien de proximité ou les machines sont très souvent autonomes et de petite puissances, et le grand éolien ou l'énergie électrique est produite directement sur le réseau de distribution avec des machines de plusieurs centaines de KW, voire de plusieurs MW.

Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connait une évolution très rapide à cause de ces performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il en demeure quelques problèmes notamment liés aux contacts mécaniques (bagues). Ainsi la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituées de génératrices asynchrones à double alimentation car elles apportent non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permettent un transfert optimal de la puissance au réseau.

La discussion sur état d'art de la MADA , sa modélisation, les avantages et les inconvénients de l'utilisation des convertisseurs statiques pour l'alimentation de la MADA nous amène à proposer deux configurations, une ou la machine est alimentée par deux convertisseurs, l'un au stator et l'autre au rotor et dédiée à des applications industrielles telles le laminage ou le pompage, l'autre ou la machine est alimentée par un convertisseur au rotor alors que le stator est lié au réseau (fonctionnement en générateur pour une application du type éolien).

Alors que le troisième chapitre sera consacré à la modélisation de l'alimentation de commande de la MADA.

Ensuite, dans la dernière partie de cette thèse a permis de transférer les équations de la MADA sur des blocs sous MATLAB/SIMULINK ou on a réalisé un schéma global de la chaine conversion avec des résultats de simulations suivant la vitesse de vent. On a conclu que si la vitesse de vent se change indique un changement sur la vitesse mécanique, les courants statoriques et les puissances actives et réactives de la MADA.

A partir de cette étude d'éolienne à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et des résultats de simulations obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

Grace au développement dans la commande électrique et l'apparition de diverses structures des convertisseurs de l'électronique de puissance permettant à présent de disposer de sources d'alimentation à fréquence variable, la MADA présente une solution idéale pour les entraînements à grandes puissances.

L'étude des machines électrique en général et la MADA en particulier exige une bonne modélisation mathématique décrivant l'ensemble de la machine et le système à entraîner. Cela permet de prévoir les performances dynamiques et statiques de ses entrainements.

Face à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du dispositif MADA-convertisseur sont envisageables :

- ✓ Intégration éventuelle d'un système de stockage et optimisation technique et économique de la chaîne de conversion.
- ✓ Intégration de la MADA dans un parc éolien mixte avec ou sans stockage.
- ✓ Etude des perturbations inhérentes au couplage du dispositif avec le réseau :
 - Réactions des génératrices vis-à-vis du déséquilibre des réseaux, des creux de tensions et des fluctuations.
 - Réactions du réseau vis-à-vis de l'intermittence et l'irrégularité de la production de l'énergie.
 - Interactions avec les autres génératrices du réseau.

Aussi, l'ensemble de ces travaux peut être suivi et compléter par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'ensemble chaîne de conversion éolienne-réseau de distribution. Parmi les perspectives envisageables :

- ✓ Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la saturation magnétique.
- ✓ Evaluation de fonctionnement de la MADA lorsqu'elle participe au contrôle de la tension du réseau en absence ou en présence de défauts.
- ✓ L'éolienne pourrait contribuer à l'augmentation des taux de pénétration de cette production au sein des réseaux électriques en configurant la commande de ce système de génération de manière à :
 - Concevoir un contrôle local de tension de cette éolienne respectant la sensibilité ampérométrique des protections ainsi que la coordination avec la régulation du bus continu.
 - Estimer la puissance de stockage additionnelle nécessaire pour les domaines de fonctionnements critiques.

Références Bibliographiques

[1] S. E. AIMANI

« Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Université des sciences et technologies de Lille 1, (USTL), France.

[2] F.Kendouli, K.Nabti, K.Abed et H.Benalla

« Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone a double alimentation » ; revue des énergies renouvelable vol.14 N°1 (2011) 109-120

[3] A. BOYETTE

« Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec Système de stockage pour la production éolienne » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11 Décembre 2006.

[4] O. GERGAUD

«Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé un accumulateur» ; Mémoire de doctorat en électrotechnique, école normale supérieure de CACHAN, décembre 2002.

[5] A. M. SIDDO

« Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » ; Mémoire de fin étude d'ingénieur en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, El-Harrach, 2007.

[6] F. POITIERS

« Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 Décembre 2003.

[7] B. MULTON

« Aérogénérateurs électriques» ; Master Recherche STS IST-SPEE Paris 11 – ENS Cachan 2009.

[8] Y. DJERIRI

« Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi Bel-abbes, 2009.

[9] S. AMEZIANE

« Implantation expérimentale de la MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2009.

[10] G. COKUNLU

«Wind turbine modelling and controller design » ; Mémoire de fin d'étude ingénieur en génie mécanique, Université Istanbul, juin 2007.

[11] L. KHETTACHE

« Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2007.

[12] A. MIRECKI

« Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance» ; Mémoire de doctorat en génie électrique, institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

[13] P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI

«Eoliennes» ; Techniques de l'ingénieur, Bm4640.

[14] B. FRANCOIS

« Intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique » ; Séminaire "Le développement des Energies éoliennes en Tunisie" Association des Spécialistes Electriciens de Tunisie, 19 novembre 2009.

[15] B. CHITTI BABU, B. MOHANTY

« Doubly-fed induction generator for variable speed wind energy conversion system modelling & simulation » ; International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 1, February, 2010,1793-8163.

[16] R. REDJEM

« Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2009.

[17] M. MACHMOUM, F. POITIERS, L. MOREAU, M.E. ZAIM, R. LE DOEUFF

« Étude d'éolienne a vitesse variable basée sur des machines asynchrone (MAS-MADA) » ; GE44 Toulouse.

[18] A. DAVIGNY

«Participations aux services systèmes de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » ; Mémoire de doctorat en génie électrique, Université de Lille 1, 2007.

[19] B. MULTONE, X. ROBOAM, B. DAKYO, C. NICHITA, O. GERGAUD, H. BEN AHMED

«Aérogénérateurs électriques» ; Techniques de l'ingénieur, D3 960.

[20] A. MULLANE, G. LIGHTBODY, R. YACAMINI

«Adaptive Control of Variable Speed Wind Turbines» ; Revu. Energ. Ren.: Power Engineering (2001)101-110.

[21] L. ABDELHAMID

« Contribution à l'étude des performances des générateurs électromagnétique utilisées dans les systèmes éoliens » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2008.

[22] Y. ELBIA

« Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 15 Juin 2009.

[23] R. AZAIZIA

«Etude et Commande d'une Machine Asynchrone a Double Alimentation Alimentée par un Convertisseur Multi niveaux» ; Mémoire de magister en génie électrique, Université M'hamed Bougara de Boumerdes, 2008.

[24] F. BOUMARAF

«Commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone a double alimentation» ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2009.

[25] N. HAMADI

« Modélisation et commande des génératrices éoliennes » ; Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, janvier 2008.

[26] N. AKKARI

« Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2010.

[27] A. DENDOUGA

« Contrôle des puissances active et réactive de la machine asynchrone a double alimentation DFIM » ; Mémoire de doctorat en sciences et électrotechnique, Université de Batna, 10 Février 2010.

[28] P. E. VIDAL

« Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation »; Thèse de doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 14 Décembre 2004.

[29] M. ADJOUDJ, M. ABID, A. AISSAOUI, Y. RAMDANI, H. BOUNOUA

«Commande par Mode glissant d'une machine asynchrone a double alimentation montée dans une éolienne» ; Revue « Nature & Technologie » n° 34 02/Janvier 2010.

[30] A. CHAIBA

« Commande de la machine asynchrone a double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielles» ; Mémoire de doctorat en électrotechnique, Université de Batna, 2010.

[31] G. SALLOUM

« Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation » ; Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 13 Mars 2007.

[32] B. FRANCOIS

« La génératrice asynchrone à double alimentation modélisation et commande » ; master de recherche, Université de Lille1, 2010.

[33] S. KHOJET EL KHIL

« Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) »; Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse & école Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 04 Décembre 2006.

[34] R. MELICIO, V.M.F. MENDES

« Doubly fed induction generator systems for variable speed wind turbine» ;

[35] D.Aguglia

« Conception globales des générateurs asynchrone a double alimentation pour éoliennes» thèse doctorat ; université LAVAL, Québec décembre 2005.

[36] B. BABYPRIYA, R. ANITA

« Modelling, simulation and analysis of doubly fed induction generator for wind turbines» ; Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 60, NO. 2, 2009, 79–85

[37] S. MULLER, M. DEIKE, RIK W. DE DONCKER

« Doubly fed induction generator systems for wind turbines» ; IEEE industry applications magazine May/june 2002.

Sites internet

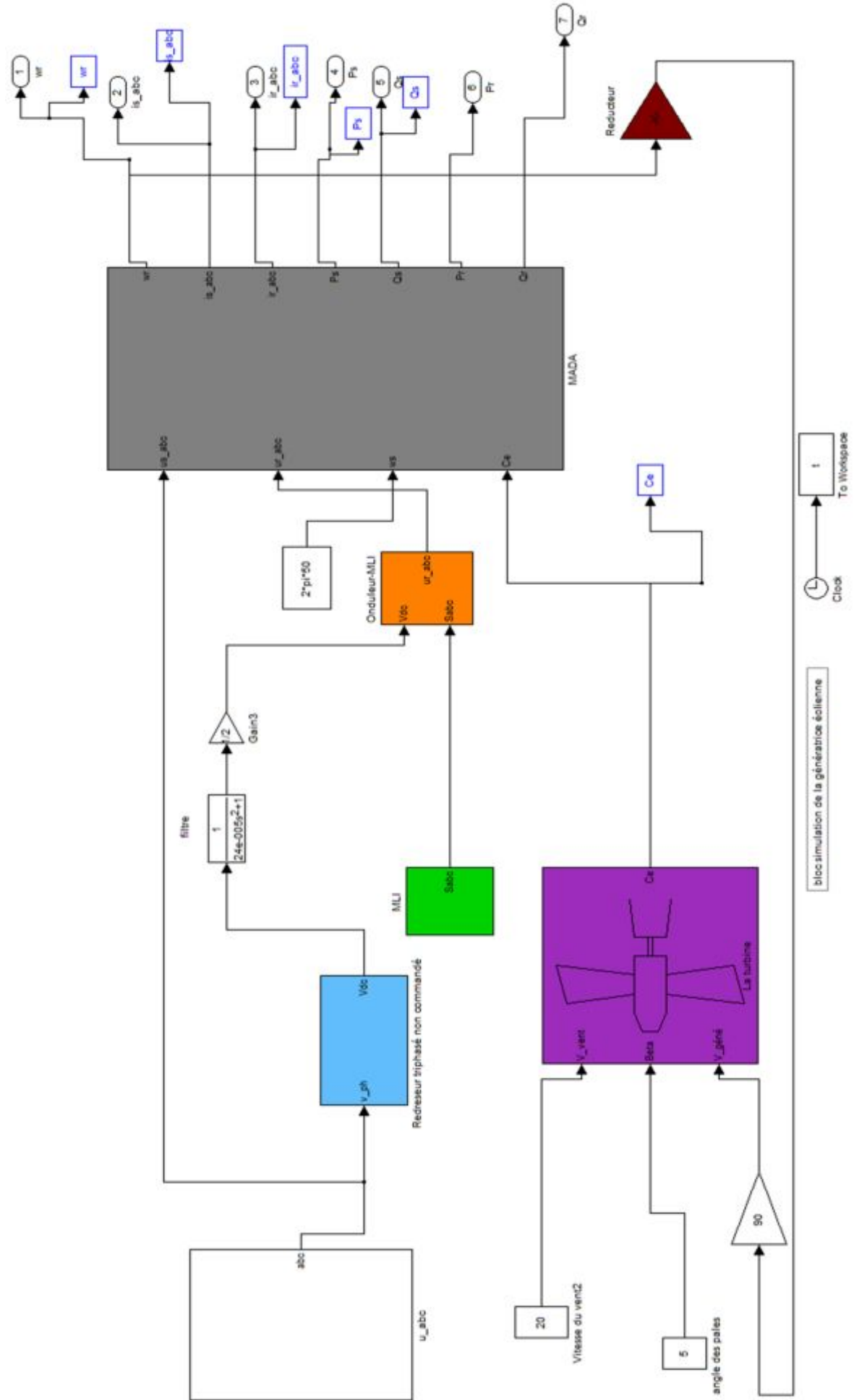
[S1] <http://www.energies-renouvelables.org/>

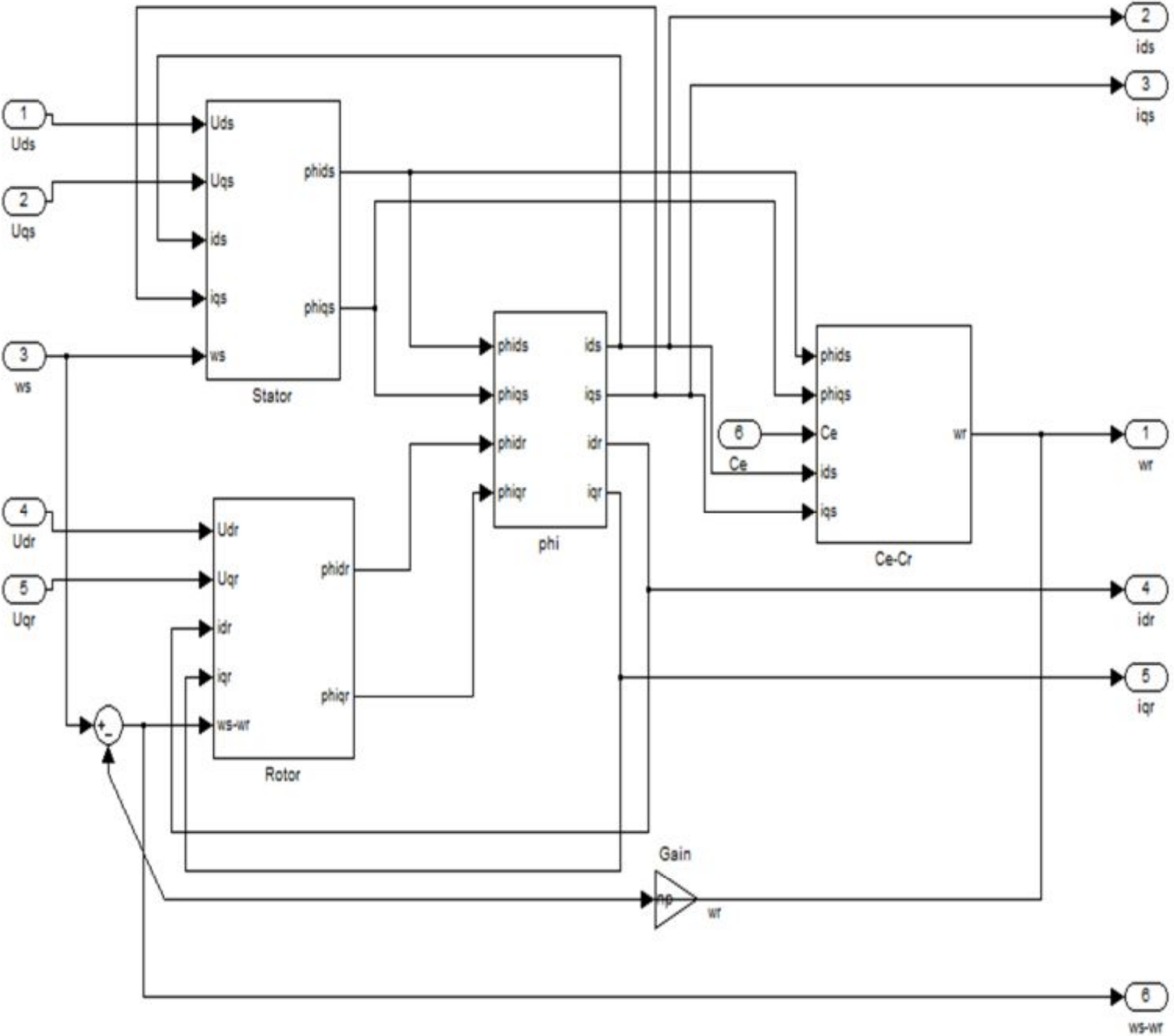
[S2] <http://www.cder.dz/>

[S3] Encyclopédie libre: [www.wikipédia.com/énergie éolienne](http://www.wikipédia.com/énergie%20éolienne).

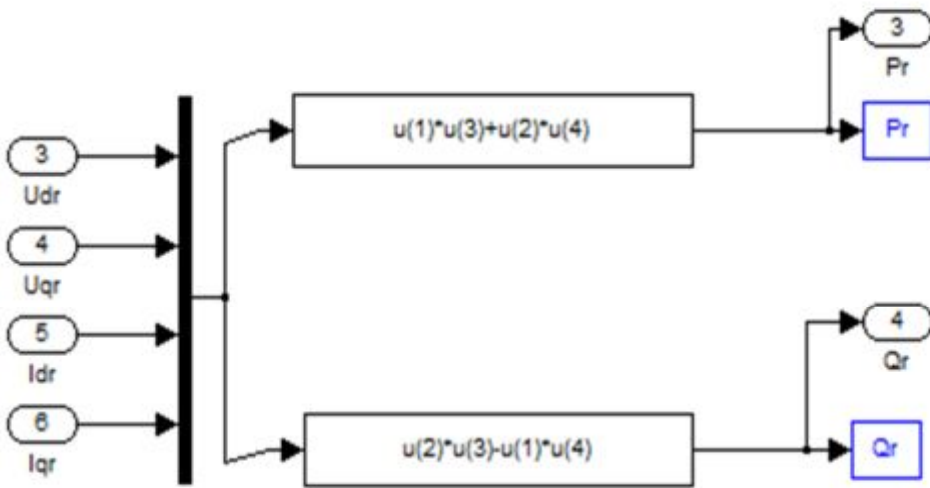
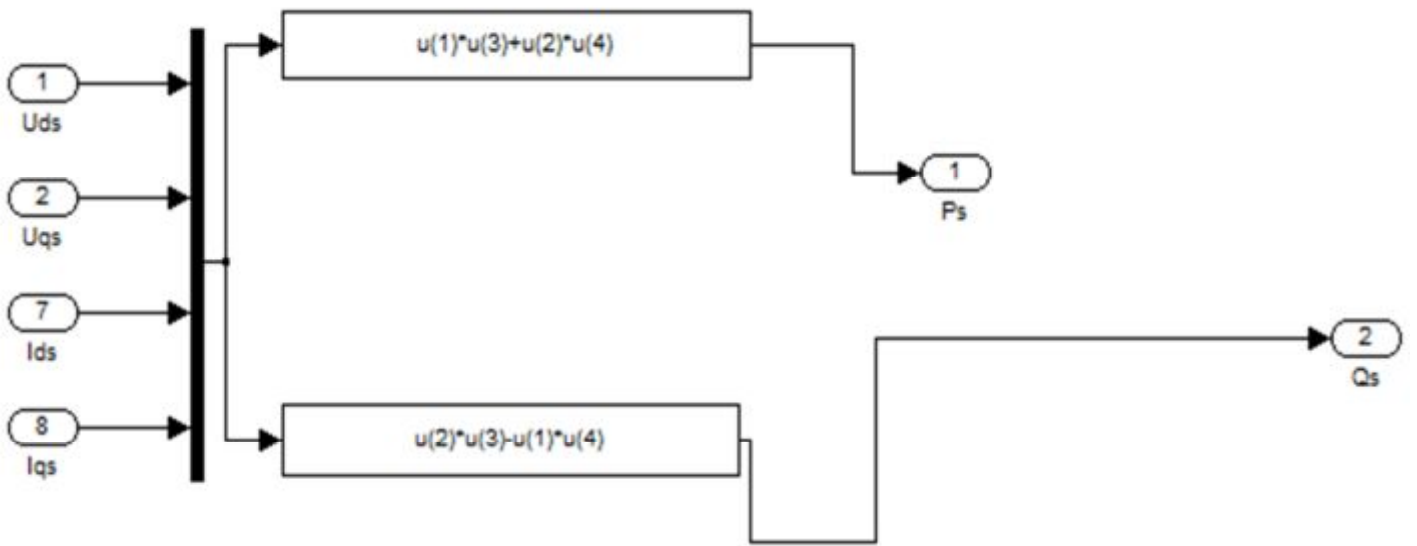
[S4] Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie : <http://www.ademe.fr>

[S5] <http://www.thewindpower.net/>





Bloc simulation de la MADA



Bloc simulation des puissances

Annexe 2

Paramètres de la machine

Symbole	Description	Valeur	Unité
R_S	Résistance statorique	0.435	Ω
R_R	Résistance rotorique	0.816	Ω
L_S	Inductance statorique	0.071	H
L_R	Inductance rotorique	0.071	H
M	Inductance mutuelle	0.069	H
J	Inertie de moteur	50	KG. M²
P	Nombre de paire pole	2	

Paramètres de filtre

Symbole	Description	Valeur	Unité
C_f	Capacité filtre	600	μF
L_f	Inductance filtre	400	mH

Paramètres d'éolienne

Symbole	Description	Valeur	Unité
R	Rayon d'éolienne	35.25	m
G	Gain du multiplicateur	90	