

République Algérienne Démocratique et
Populaire Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'étude

*En vue d'obtention du diplôme de Master en
électromécanique. Options : Electromécanique*

Thème

***Contrôle d'un système éolien en fonctionnement
autonome***

Réalisé par:

M^r BERIHAN Mohand-cherif

M^r TIDJET Khalef

Encadré par:

M^{me} CHEKKAL Samira

M^r HAMITOUCHE Kamel

Promotion 2019-2020

Remerciements

Avant tout nous aimerions exprimer nos gratitude envers notre créateur, celui qui nous a donné la capacité, le courage, la volonté et la possibilité d'accomplir ce travail, son soutien nous a été fort utile et très ressenti « louange à DIEU ».

Nous aimerons dans ces quelques lignes remercier toutes les personnes qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de notre travail.

*Nous sincères remerciements pour notre encadreur **Mme CHEKKAJ samira** pour le choix de ce sujet intéressant, pour avoir dirigé notre travail, de nous avoir permis de bénéficier de son aide consistante, de ses conseils judicieux, ainsi que pour le temps précieux qu'elle nous a consacré pendant la rédaction de ce mémoire, pour la documentation qu'elle a mis à notre disposition. Nous la remercions de tout notre cœur.*

*Nous désirons alors exprimer notre profonde gratitude à notre Co-encadreur Monsieur **Mr Kamel hamitouche** pour avoir accepté de me diriger patiemment, pour ses efforts et son aide précieux qu'il a consacré pour notre service, on a pu bénéficier à la fois de ses compétences scientifiques, et de sa grande disponibilité, tant pour résoudre les difficultés rencontrées lors de notre réalisation, de répondre à nos questions.*

Nos vifs remerciements pour les membres de jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être examinateurs de notre mémoire.

Nous exprimons notre gratitude à l'ensemble des professeurs du département d'électromécanique qui ont contribué à notre formation, on les prie de bien vouloir croire à notre gratitude en espérant que cet humble travail de ces cinq dernières années fera crédibilité de leurs efforts.

DEDICACE

En premier lieu, je remerciée DIEU, qui ma donnée le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail :

✓ *À la lumière de ma vie, mes chers parents, exemple de courage et de sérieux qui m'ont tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves .en ces quelques mots, je leurs exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'ils m'ont offert comme soutien, encouragement et aide. je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*

✓ *À mes sœurs*

✓ *À mes frères*

✓ *À toutes ma famille*

✓ *À tous mes amis*

Md cherif BERIHAN

DEDICACE

En premier lieu, je remerciée DIEU, qui m'a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail :

✓ *À la lumière de ma vie, mes chers parents, exemple de courage et de sérieux qui m'ont tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves .en ces quelques mots, je leurs exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'ils m'ont offert comme Soutien, encouragement et aide. je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*

➤ *À mes sœurs*

➤ *À mon frère*

➤ *A ma chère femme*

➤ *À toute ma famille*

➤ *À tous mes amis*

KHALEF TIDJET

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier la machine asynchrone double étoile dans le contexte d'une conversion de l'énergie éolienne dans des sites isolés. Dans un premier temps, des généralités sur les éoliennes et les systèmes autonomes ainsi que leurs applications suivies par les différentes machines utilisées dans ces systèmes. Les modèles mathématiques de chaque élément de la chaîne de conversion d'énergie éolienne étudiée, ont été présentes, à savoir le modèle de la GASDE et la turbine éolienne, ainsi que les convertisseurs statiques associés à la génératrice. Enfin, dans la dernière partie du mémoire nous avons appliqué la commande vectorielle sur la machine asynchrone double étoile. Le but de cette technique est de maintenir une tension constante à la sortie du redresseur pour des charges et des vitesses variables. Cette tension est ensuite ondulée à la bonne amplitude et fréquence pour une utilisation en site isolé. Les résultats de simulation montrent l'efficacité et la fiabilité de la stratégie de contrôle proposée dans mémoire.

Mot clés : Energie éolienne, Autonome, GASDE (Génératrice asynchrone double étoile) convertisseur, Commande vectorielle

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة الآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج في سياق تحويل طاقة الرياح في المواقع المعزولة. أولاً ، معلومات عامة عن توربينات الرياح والأنظمة المستقلة بالإضافة إلى تطبيقاتها متنوعة بالآلات المختلفة المستخدمة في هذه الأنظمة. نوقشت النماذج الرياضية لكل عنصر من عناصر سلسلة تحويل طاقة الرياح، ألا وهي نموذج المولد، عنفة الرياح، وكذلك المحولات الساكنة المرتبطة بها. في الجزء الأخير من هذه المذكرة، طبقنا التحكم الشعاعي على الآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج. الغرض من هذه التقنية هو الحفاظ على جهد ثابت عند خروجها من المقوم لأحمال وسرعات مختلفة. ثم يتم تموج هذا الجهد عند السعة والتردد الصحيحين لاستخدامه في الموقع المعزول، تظهر نتائج المحاكاة كفاءة وموثوقية في استراتيجيات التحكم المقترحة في هذه المذكرة.

الكلمات المفتاحية : طاقة الرياح، الأنظمة المستقلة، الآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج، المحولات، التحكم الشعاعي.



Sommaire

Sommaire

Abréviations	I
Notations	IV
Liste des figures	V

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

Chapitre I: Généralités sur les aérogénérateurs et les systèmes autonomes

I.1	Introduction	3
I.2	Energie éolienne	3
I.2.1	Historique de l'énergie éolienne	3
I.2.2	L'énergie éolienne en Algérie.....	4
I.2.3	L'énergie éolienne en quelque chiffre	5
I.2.4	Définition de l'énergie éolienne.....	5
I.2.5	Différent type d'éolienne	7
I.2.5.1	Eoliennes à axe vertical.....	7
I.2.5.2	Eoliennes à axe horizontal	8
I.3	Définition d'un système autonome	9
I.4	Quelques types des systèmes autonomes	10
I.4.1	Combinaison de plusieurs sources d'énergie pour les gros consommateurs	10
I.4.2	Système photovoltaïque autonome	11
I.4.3	Groupe électrogène	12
I.4.4	Eoliennes en fonctionnement autonome	13
I.5	Stockage de l'énergie éolienne.....	14
I.5.1	Stockage électrochimique	14
I.5.2	Stockage inertiel.....	14
I.5.3	Stockage magnétique	15
I.5.4	Stockage hydraulique.....	15
I.5.5	Le stockage thermique	15
I.6	Classification des machines électriques utilisées dans un système autonome	15

I.6.1	Machine synchrone	15
I.6.1.1	Machine synchrone à rotor bobiné.....	15
I.6.1.2	Machines synchrones à aimants permanents	15
I.6.1.2.1	Structure avec redresseur à diodes	16
I.6.1.2.2	Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur.....	16
I.6.1.2.3	Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont.....	17
I.6.1.2.4	Structure avec redresseur à MLI	17
I.6.1.3	Machines à reluctance variable.....	18
I.6.2	Machines asynchrones à cage d'écureuil.....	19
I.6.2.1	Machine asynchrone auto-excitée par condensateurs fixes	19
I.6.2.1.1	Machine asynchrone auto excitée par un seul condensateur fixe.....	20
I.6.2.1.2	Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes	20
I.6.2.2	Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes avec un système de compensation.....	21
I.6.2.2.1	Capacités de compensation en série	21
I.6.2.2.2	Batterie de condensateurs commandés.....	22
I.6.2.2.3	Générateurs de puissance réactive.....	22
I.6.2.3	Configuration avec convertisseur unidirectionnel (redresseur à diodes ou mixte)	23
I.6.2.4	Configuration avec convertisseurs bidirectionnels (convertisseurs à MLI).23	
I.7	Machines multiphasées	24
I.8	Quelque technologies de commande et applications de la GASDE.....	24
I.9	Avantages et inconvénients des machines polyphasées ou multi étoiles.....	27
I.9.1	Avantages.....	27
I.9.2	Inconvénients	28
I.10	Conclusion.....	28
<i>Chapitre II: Modélisation des différentes parties du système étudié</i>		
II.1	Introduction	29
II.2	Description du système étudié.....	29
II.2.1	Modélisation du système éolien	29
II.2.1.1	Zones de fonctionnement d'une éolienne	29
II.2.1.2	Modélisation de la turbine	30
II.2.1.3	Modèle aérodynamique des pales	31

II.2.1.4	Modèle de multiplicateur	32
II.3	Description de la machine asynchrone double étoile	32
II.4	Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile	34
II.4.1	Hypothèses Simplificatrices :	34
II.4.2	Équations générales de la machine :	34
II.4.2.1	Equations électriques de la MASDE.....	34
II.4.2.2	Equations magnétiques de la MASDE.....	36
II.4.2.3	Expression du couple électromagnétique.....	37
II.4.2.4	Equation mécanique.....	38
II.4.3	Modèle biphasé de la MASDE.....	38
II.4.3.1	Transformation de Park.....	38
II.4.3.2	Modèle de la MASDE selon le système d'axes (d, q)	39
II.4.4	Choix du référentiel.....	40
II.4.4.1	Référentiel lié au stator	40
II.4.4.2	Référentiel lié au rotor	41
II.4.4.3	Référentiel lié au champ tournant	41
II.4.5	Modèle biphasé de la MASDE lié au système d'axes (d, q).....	41
II.4.6	Puissance absorbée et couple électromagnétique.....	43
II.5	Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande MLI	45
II.5.1	Modélisation de l'onduleur de tension	45
II.5.2	Stratégie de commande sinus-triangle.....	46
II.5.3	Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI	47
II.6	Modélisation de bus continu	48
II.7	Simulation et interprétation des résultats	49
II.8	Conclusion.....	53

Chapitre II: Modélisation des différentes parties du système étudié

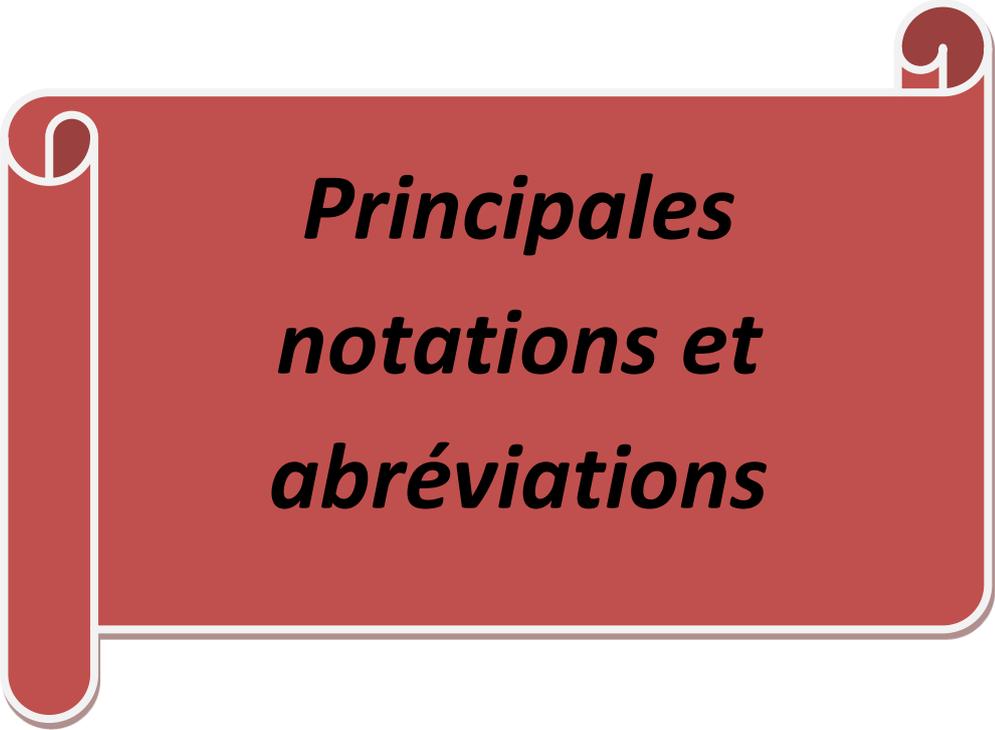
III.1	Introduction	53
III.2	Principe de la commande vectorielle	53
III.3	Théorie du flux orienté.....	54
III.4	Différentes méthodes de la commande vectorielle	55
III.4.1	Méthode de commande directe.....	55
III.4.2	Méthode de commande indirecte	55

III.5	Commande vectorielle indirecte.....	55
III.5.1	Application de la commande indirecte sur la MASDE	58
III.5.2	Principe du defluxage	58
III.6	Application de la commande vectorielle pour la GASDE en fonctionnement autonome	59
III.7	Simulation et interprétation des résultats	60
III.7.1	Influence de la variation de la charge.....	61
III.7.2	Influence de la variation de la vitesse d'entraînement	64
III.8	Conclusion.....	70

Conclusion générale.....	72
---------------------------------	-----------

Bibliographie.

Annexe

A decorative red scroll graphic with a white outline, featuring a rolled-up top edge and a vertical strip on the left side. The text is centered within the scroll.

***Principales
notations et
abréviations***

Abréviations

C_p	Coefficient de puissance
C_{p-max}	Coefficient de puissance maximal
C_{em}	Couple électromagnétique [N.m]
C_{em}^*	Couple électromagnétique de référence [N.m]
C_t	Couple mécanique de la turbine [N.m]
C_f	Couple de frottement visqueux [N.m]
C_r	Couple résistant [N.m]
E	Tension continue [V]
f	Fréquence de la tension de référence [Hz]
f_p	Fréquence de la porteuse [Hz]
G	Gain du multiplicateur de vitesse
g	Glissement de la machine
$i_{as1,2}, i_{bs1,2}, i_{cs1,2}$	Courants triphasés statoriques (étoiles 1 et 2) [A]
i_{dc}	Courant capacitif du bus continu [A]
$i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}, i_{dr}, i_{qr}$	Courants statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques directes et quadratiques respectivement [A]
$i_{d1L}, i_{q1L}, i_{d2L}, i_{q2L}$	Courants des charges résistives-inductives selon (d, q) [A]
$i_{d1sh}, i_{q1sh}, i_{d2sh}, i_{q2sh}$	Courants d'excitations (étoiles 1 et 2) suivant (d, q) [A]
I_f	Courant d'induit [A]
$[i_{s1}] [i_{s2}] [i_r]$	Vecteurs des courants statoriques et rotoriques [A]
J	Moment d'inertie [$kg.m^2$]
k_f	Coefficient de frottement visqueux [Nms/rd]
k_i	Gain intégral
k_p	Gain proportionnel
L_m	Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1 et 2 et le rotor [H]
L_{ms}	Valeur maximal des coefficients d'inductance mutuelle statorique [H]
L_{mr}	Valeur maximal des coefficients d'inductance mutuelle rotorique [H]
L_{s1}, L_{s2}, L_r	Inductances de fuites d'une phase de l'étoile(1,2) et de

Abréviations

	rotor [H]
L_{sr}	Valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles entre une étoile et le rotor [H]
$L_{s1} + L_r$	Inductance propre cyclique d'une phase de l'étoile 1 [H]
$L_{s2} + L_r$	Inductance propre cyclique d'une phase de l'étoile 2 [H]
$L_r + L_m$	Inductance propre cyclique d'une phase rotorique [H]
m	Indice de modulation de l'onduleur
N	Vitesse de rotation de la machine [tr/mn]
P	Nombre de paires de pôles de la GASDE
P_s	Puissance actives statoriques totale des deux étoiles [W]
P_{ele}	Puissance de référence de bus [W]
P_{em}	Puissance électromagnétique [W]
$P_{mec-opt}$	Puissance mécanique optimale [W]
P_t	Puissance mécanique [W]
P_m	Puissance extraite du vent [W]
P_{ven}	Puissance de vent [W]
P_{mt}	Puissance théorique de vent [W]
Q_s	Puissance réactive statorique totale des deux étoiles [VAr]
q	Nombre d'encoche par pole et par phase
R_s	Résistance électrique [Ω]
R_{s1}	Résistance d'une phase (statorique) de l'étoile 1 [Ω]
R_{s2}	Résistance d'une phase (statorique) de l'étoile 2 [Ω]
R_r	Résistance d'une phase rotorique ramené au stator [Ω]
S	Surface balayée par la turbine
t	Temps [s]
T_p	Période du signal de la porteuse [s]
T	Constante de temps d'un système du premier ordre [s]
V	Vitesse de vent
$V_{a,b,cs1,2}$	Tension triphasé statorique (étoile 1et 2) [V]
V_{ds1}, V_{qs1}	Tension de l'étoile 1 dans le référentielle de Park (d,q) [V]
V_{ds2}, V_{qs2}	Tension de l'étoile 2 dans le référentielle de Park (d,q) [V]
V_{dr}, V_{qr}	Tension rotorique dans le référentielle de Park (d,q) [V]

Abréviations

$[V_{s1}] , [V_{s2}], [V_r]$	Vecteur des tensions statoriques et rotorique [V]
α	Angle électrique de décalage entre les deux étoiles [rd]
β	Angle de calage des pales de la turbine [°]
$\varphi_{a,b,cr}$	Flux triphasés rotorique [Wb]
$\varphi_{a,b,cs1,2}$	Flux triphasés statorique (étoiles 1 et 2) [Wb]
$\varphi_{ds1}, \varphi_{qs1}$	Flux de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d,q) [Wb]
$\varphi_{ds2}, \varphi_{qs2}$	Flux de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d,q) [Wb]
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux rotorique dans le référentiel de Park (d,q) [Wb]
φ_s	Flux statorique selon (d, q) [Wb]
$[\varphi_s] , [\varphi_r]$	Vecteurs des flux statorique et rotorique [Wb]
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de la génératrice [rd/s]
Ω_{mec}^*	Vitesse mécanique de référence [rd/s]
Ω_t	Vitesse mécanique de l'arbre de la turbine [rd/s]
ω_{gl}	Pulsation électrique du glissement [rd/s]
ω_r	Pulsation électrique des grandeurs rotorique [rd/s]
ω_s	Pulsation électrique des grandeurs statorique [rd/s]
ω_s^*	Pulsation électrique des grandeurs statorique de référence [rd/s]
θ_m	Position de l'axe d par rapport à l'étoile 1 [rd]
θ_2	Position de l'axe d par rapport à l'étoile 2 [rd]
θ_r	Position du rotor par rapport à l'étoile 1 [rd]
Φ_{md}	Flux magnétisant selon l'axe d [Wb]
Φ_{mq}	Flux magnétisant selon l'axe q [Wb]
ρ	Densité volumique de l'air [1,225kg/m ³]
λ	La vitesse relative [rd/s]
λ_{opt}	Rapport de vitesse optimale

Notations

Notations

FOC	Field Oriental Contrôle (commande à flux orienté)
MASDE	Machine Asynchrone Double Etoile
MCC	Machine à Courant Continu
M.L.I	Modulation par Largeur d'Impulsion
MRV	Machine à reluctance variable
MAS	Machine asynchrone
GSAP	Génératrice Synchrone à Aimants Permanents
GS	Génératrice Synchrone
GAS	Génératrice Asynchrone à Cage
GASDE	Génératrice asynchrone double étoile
PI	Proportionnel-Intégrale
STATCOM	Static Var Compensator

A red scroll graphic with a white outline, featuring a vertical strip on the left side and a small circular detail at the top right corner. The text is centered on the scroll.

***Listes
des figures***

Listes de figures

Chapitre I

Figure.I 1 Ferme éolienne d'Adrar Algérie	5
Figure.I 2 Evolution de la puissance de parc éolienne dans le monde	5
Figure.I 3 Principe de conversion de l'énergie éolienne	6
Figure.I 4 Éolienne de type Darrius à gauche, Savonius au milieu et Venturi à droite	7
Figure.I 5 Éolienne à axe horizontale	8
Figure.I 6 Structure d'un système autonome connecté à une charge	9
Figure.I 7 Schéma montre une combinaison de plusieurs sources d'énergie pour les gros consommateurs.....	11
Figure.I 8 Schéma simplifié d'un système PV autonome	12
Figure.I 9 Exemple de groupes électrogènes semi-industriels.	13
Figure.I 10 Système éolien en fonctionnement autonome	14
Figure.I 11 Machine synchrone avec redresseur à diodes.....	16
Figure.I 12 Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.....	17
Figure.I 13 Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont	17
Figure.I 14 Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI.....	18
Figure.I 15 Machine synchrone à reluctance variable connectée à un banc de capacités.....	19
Figure.I 16 Machine asynchrone auto-excitée avec un seul condensateur	20
Figure.I 17 Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs	21
Figure.I 18 Machine asynchrone auto-excitée avec compensation série.....	21
Figure.I 19 Machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs et gradateur	22
Figure.I 20 Structure avec pont à diodes et hacheur	23
Figure.I 21 Structure à base de deux convertisseurs MLI.....	23
Figure.I 22 Schéma de principe du système de générateur de six phases auto-excité	25
Figure.I 23 Système de conversion éolienne basé sur la GASDE.....	25
Figure.I 24 Solution pour des éoliennes à vitesse variable ou hydro système de conversion d'énergie	26
Figure.I 25 Solution pour des éoliennes à vitesse variable ou hydro système de conversion d'énergie	26

Chapitre II

Figure.II 1 Zones de fonctionnement d'une éolienne typique.....	30
Figure.II 2 Turbine éolienne	31
Figure.II 3 Modèle du multiplicateur.....	32
Figure.II 4 Représentation schématique des enroulements de la MASDE.....	33
Figure.II 5 Schéma global du système étudié	33
Figure.II 6 Schéma d'enroulements de la MASDE dans les axes d,q.....	40
Figure.II 7 Schéma de l'onduleur triphasé.....	46
Figure.II 8 MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI.....	48
Figure.II 9 Représentation du bus continu	48
Figure.II 10 Schéma bloc global de simulation de la MASDE alimentée par deux onduleurs M.L.I. ...	49



Listes de figures

Figure.II 11 Evolution des caractéristiques de la MASDE alimente par deux Onduleurs de tension, suivi de l'application des charges.....	53
---	----

Chapitre III

Figure.III 1 Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE.....	54
Figure.III 2 Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC)	56
Figure.III 3 Représentation schématique de la commande FOC sur la MASDE	58
Figure.III 4 Schéma de défluxage.....	59
Figure.III 5 Schéma global du système étudié.....	60
Figure.III 6 Allure de la tension du bus continu	61
Figure.III 7 Allure du puissance électromagnétique	62
Figure.III 8 Allure du couple électromagnétique.....	62
Figure.III 9 Allure des courants statoriques des deux étoiles.....	63
Figure.III 10 Allure des courants et tensions statoriques de l'étoile 1	64
Figure.III 11 Allure de flux rotorique direct.....	64
Figure.III 12 Allure de flux en quadrature.....	64
Figure.III 13 Vitesse d'entraînement.....	65
Figure.III 14 Allure de la tension du bus continu	66
Figure.III 15 Allure de la puissance délivrée.....	66
Figure.III 16 Allures de couple électromagnétique et sa référence	66
Figure.III 17 Allures de couple électrique	67
Figure.III 18 Allure de puissance électrique.....	67
Figure.III 19 Allure de profil de vent	68
Figure.III 20 Allure de la tension du bus continu	68
Figure.III 21 Allure de la puissance délivrée.....	69
Figure.III 22 Allures de couple électromagnétique et sa référence	69
Figure.III 23 Allure de puissance électrique.....	70
Figure.III 24 Allures de couple électrique	70

A red scroll graphic with a white border and decorative scroll ends. The text is centered on the scroll.

*Introduction
générale*

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique, ces dernières décennies est devenue l'un des facteurs primordiaux dans la vie quotidienne de l'être humain, La consommation mondiale de cette énergie ne cesse de croître.

Une grande partie de la consommation mondiale d'énergie est assurée par les énergies d'origines fossiles (pétrole, gaz, etc.). La consommation excessive de ces ressources énergétiques qui sont limitées, conduit à l'épuisement progressif de ces réserves et intensifie les rejets de gaz à effet de serre [1] et donc la pollution de l'atmosphère qui donne lieu au changement climatique.

Suite à cette prise de conscience, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire, on trouve en premier lieu l'exploitation des ressources renouvelables.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement, et s'inscrivent parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO₂. Ce sont des énergies propres, abondantes et inépuisables qui peuvent produire de l'électricité sans l'émission des gaz polluants. Elles constituent une solution économique pour fournir de l'électricité aux populations isolées [2].

Dans le monde il existe de nombreux sites isolés, où un raccordement au réseau est impossible en raison de l'éloignement et des coûts élevés de raccordement. Les systèmes autonomes ou hors-réseau qui ne sont reliés à aucun réseau de distribution représentent la solution idéale pour ces régions isolées. L'utilisation des systèmes éoliens fonctionnement en autonome pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité au niveau de ces derniers, Dans le cas d'utilisation des systèmes autonomes, plusieurs machines électriques peuvent assurer la conversion électromécanique autant que génératrice.

Depuis la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance. Les machines multiphasées ont par la suite fait un intérêt important, en particulier la machine asynchrone double étoile (MASDE), qui présente plusieurs avantages. En effet, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées, tels que : segmentation de puissance, minimisation des ondulations du couple et

Introduction générale

des pertes rotoriques, réduction des courants harmoniques, grande fiabilité et forte puissance, etc. [3]

Notre objectif dans ce travail consiste à l'étude et contrôle d'un système éolien à base des machines asynchrone double étoile en fonctionnement autonome ainsi que l'apport que pourrait apporter l'emploi de cette dernière associée à un convertisseur (onduleur MLI – redresseur MLI) en utilisant la commande vectoriel indirect.

Pour ce faire, notre travail est répartie en trois chapitres :

Le premier chapitre portera des définitions et généralités sur les systèmes autonomes. Nous décrivons diverses architectures adoptées dans les systèmes éoliens autonomes selon le type du générateur adopté, notamment les machines multiphasées dont appartient la machine asynchrone double étoile qui fait l'objet de notre travail.

Le second chapitre est consacré à la modélisation des différentes parties du système étudiée. Dans la première partie de ce chapitre on s'intéresse à la modélisation de la partie mécanique (turbine) de notre éolienne, Après on présente la modélisation de MASDE et les différentes parties de notre système (convertisseur, bus continu), nous développons en premier lieu un modèle biphasé sur la transformation de Park dans le but de réduire la complexité du système et de faciliter sa mise en équation, Nous commentons enfin les résultats de simulation après illustration et visualisation de ces derniers.

Le troisième chapitre fera l'objet de l'étude et du contrôle de la GASDE en fonctionnement autonome, dont on a utilisés la commande vectorielle par orientation du flux rotorique, qui a un principe similaire à celui de la M.C.C à excitation séparée, un aperçu sur le principe de la commande vectorielle ainsi que ses différentes méthodes s'avèrent être utile, après on a passé à l'application de la méthode indirect sur la machine, ou on va étudié le comportement de la génératrice, en premier lieu on fixant la tension de bus continu et la vitesse de rotation et en faisant varier la charge, après on applique un profil de vent. Enfin on termine par donner les résultats de simulation et leurs interprétations, suivi d'une conclusion générale.

Chapitre I

*Généralités sur les
aérogénérateurs et les
systèmes autonomes*

I.1 Introduction

Dans le monde il existe de nombreux sites isolés, où un raccordement au réseau est impossible en raison de l'éloignement et des coûts élevés de raccordement.

Les systèmes autonomes représentent la solution idéale pour ces sites, au niveau de ces systèmes on trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des groupes électrogènes.

Plusieurs types des machines électriques peuvent être utilisés pour assurer la conversion électromécanique autant que génératrice, dynamos ou alternateurs suivant la technologie utilisée. Cette dernière à l'objectif de convertir une énergie mécanique à une énergie électrique, Dans notre projet la machine à étudier sera en mode génératrice fonctionnement autonome.

Dans ce chapitre, on donnera quelques généralités et définitions sur les systèmes autonomes ainsi que leurs applications suivies par les différentes machines utilisées dans ces systèmes, on s'intéresse aux systèmes éoliens.

I.2 Energie éolienne

I.2.1 Historique de l'énergie éolienne

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environs 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable [4]. Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [5]. Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle [4].

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début

Chapitre I généralités sur les aérogénérateurs et les systèmes autonomes

avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985[2]. Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW [6].

Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés) [7]. Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [7].

I.2.2 L'énergie éolienne en Algérie

L'évaluation globale du gisement éolien dans notre pays se fait en première phase à partir des données des stations météorologiques classiques, les vents sont mesurés à un ou deux mètres du sol. Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER (Centre de Développement des Energies Renouvelables) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

Ceci a permis l'identification de neuf zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes :

- deux zones sur le littoral.
- trois zones sur les hauts plateaux.
- quatre zones en sites sahariens.

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (sud-ouest), a été confiée jeudi 21-01-2010, au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG : Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz.), filiale du groupe SONELGAZ [8].



Figure I 1 Ferme éolienne d'Adrar Algérie

I.2.3 L'énergie éolienne en quelque chiffre

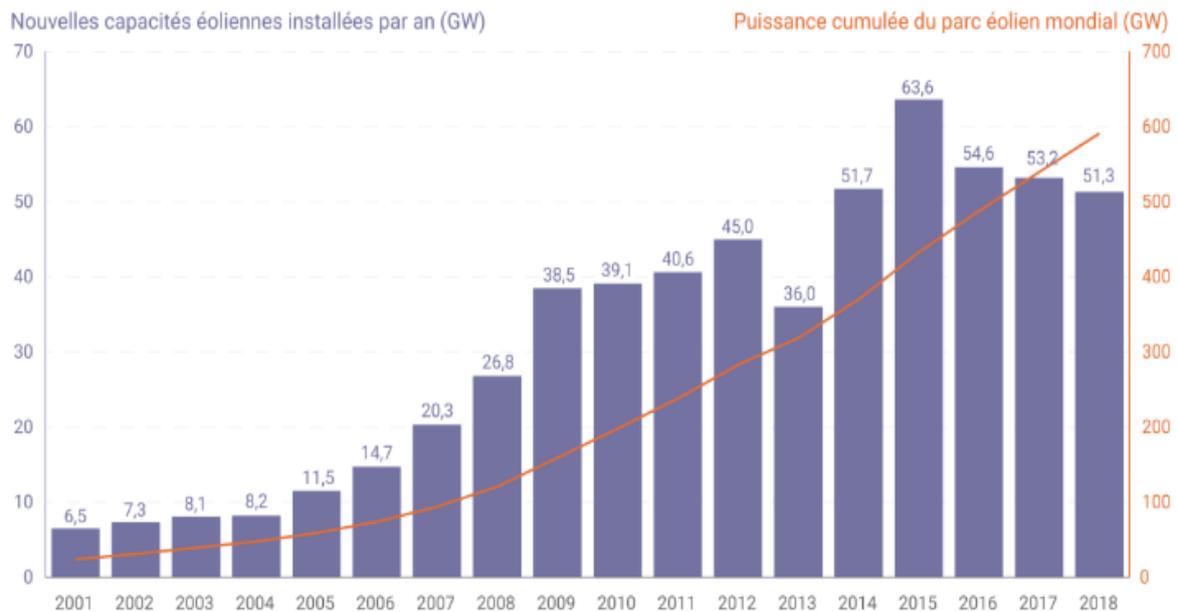


Figure I 2 Evolution de la puissance de parc éolienne dans le monde [9]

I.2.4 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une Partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. I.3) [7].

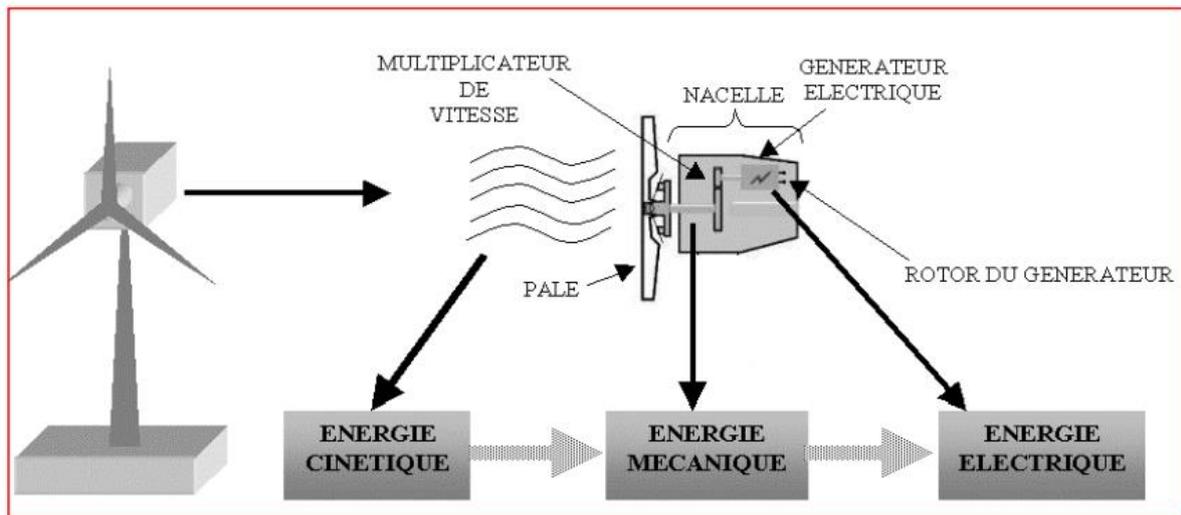


Figure I 3 Principe de conversion de l'énergie éolienne [6]

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur de vitesse, d'un système de commande et d'un convertisseur statique.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. [7]

- Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [4]

Il existe deux types d'éoliennes :

- **Faible puissance** : pour alimenter en électricité une maison, ou une installation comme le pompage d'eau.

Chapitre I généralités sur les aérogénérateurs et les systèmes autonomes

- **Grande puissance** : pour une production d'électricité pouvant atteindre 2500 à 6000 KWh, et pouvant être rattachée à un réseau de distribution. [10]

I.2.5 Différent type d'éolienne

Les éoliennes se divisent selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, on classe les éolienne en deux types, celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

I.2.5.1 Eoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance [7]. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mat qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [5].

Elle demande moins d'espace qu'une éolienne à axe horizontal. Elle s'adapte donc mieux aux bâtiments et peut fonctionner quel que soit le sens du vent, par contre, elle produit moins d'électricité que l'éolienne à axe horizontal [11].



Figure I 4 Éolienne de type Darrieus à gauche, Savonius au milieu et Venturi à droite [11]

Chapitre I généralités sur les aérogénérateurs et les systèmes autonomes

Selon Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivantes :

- Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour.
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne) [5]

I.2.5.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [12]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [13].



Figure I 5 Éolienne à axe horizontale

Chapitre I généralités sur les aérogénérateurs et les systèmes autonomes

Selon Les avantages théoriques d'une machine à axe horizontal sont les suivantes :

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [14].

I.3 Définition d'un système autonome

Les systèmes autonomes sont des unités de production d'électricité généralement de petites tailles qui ne sont reliées à aucun réseau de distribution. Ils peuvent être composés d'un générateur diesel, d'un générateur photovoltaïque et ou/éolien [15].

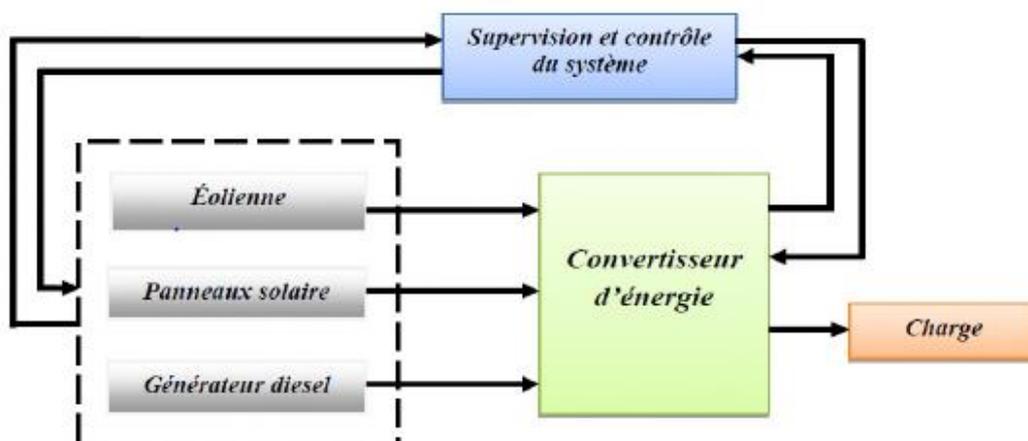


Figure I 6 Structure d'un système autonome connecté à une charge

I.4 Quelques types des systèmes autonomes [16]

I.4.1 Combinaison de plusieurs sources d'énergie pour les gros consommateurs

En associant différentes sources d'énergie (solaire, éolien, diesel), il est possible d'augmenter la fiabilité/disponibilité des systèmes et/ ou de réduire les coûts d'investissement initial. Ce genre d'association de sources d'énergie est particulièrement avantageux pour de plus gros consommateurs comme des centres commerciaux, des hôtels, des écoles et des hôpitaux.

Un système solaire hybride peut fonctionner de manière autonome et il est possible d'adapter des groupes électrogènes existants avec des modules solaires afin de réduire la consommation de fuel. Un exemple de ces combinaisons est le solaire/diesel cette technologie innovante qui intègre l'énergie solaire à des réseaux alimentés par des groupes électrogènes à moteurs diesel existants ou en création – sans besoin de batteries. Le système est constitué d'un régulateur intelligent, de panneaux solaires et d'un appareil de monitoring sophistiqué. L'énergie solaire produite réduit la charge du groupe électrogène et ainsi diminue la consommation de carburant. C'est la solution parfaite pour réduire les coûts de production d'électricité à partir de groupes électrogènes diesel dans les régions ensoleillées. C'est idéal pour les industries rurales, les hôtels et complexes touristiques, les centres de santé et les villages, voici un schéma représentatif de cette technologie.

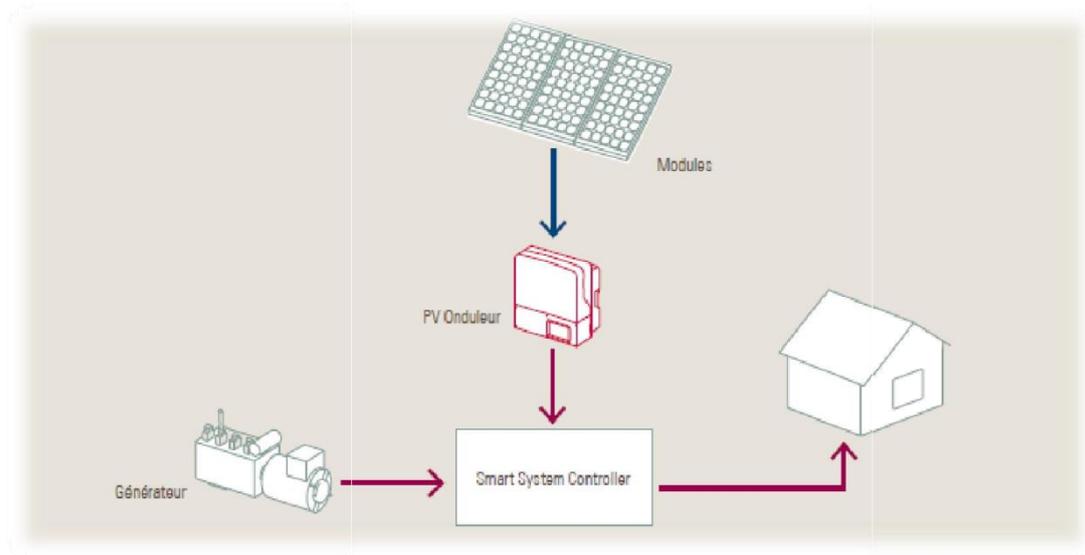


Figure I 7 Schéma montre une combinaison de plusieurs sources d'énergie pour les gros consommateurs

I.4.2 Système photovoltaïque autonome

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker surplus de l'énergie générée. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

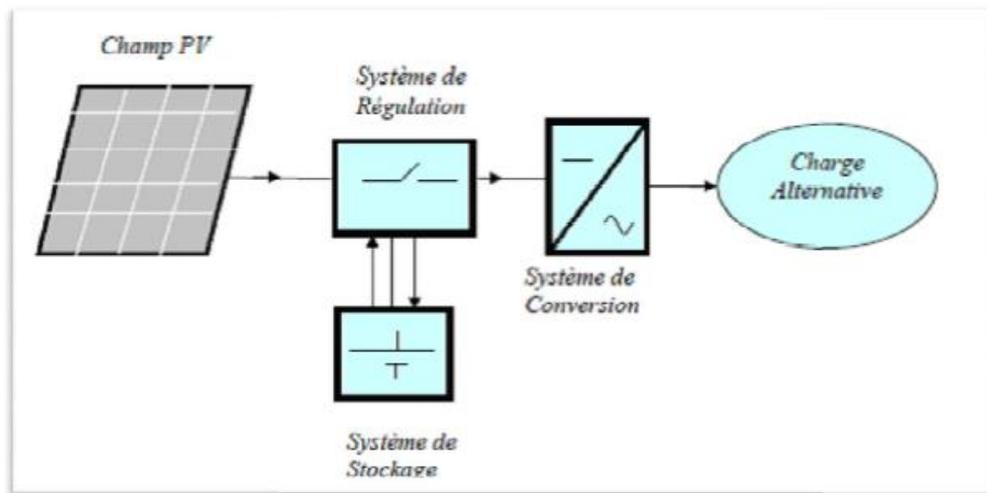


Figure I 8 Schéma simplifié d'un système PV autonome

I.4.3 Groupe électrogène

Un groupe électrogène est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité, la plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui entraîne une génératrice électrique. Leur taille et leur poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes.

Les groupes électrogènes sont utilisés en tant que source d'énergie électrique autonome :

- Dans des zones non couplés à un réseau électrique. La souplesse de l'installation du groupe électrogène, sa modularité et son coût en font le moyen de production d'électricité idéal ;
- Pour les systèmes de secours nécessitant une haute qualité de fourniture d'énergie (évacuation de personnes, hôpitaux, etc.). Il présente des avantages liés à un large éventail de puissance, la rapidité de sa mise en œuvre et sa capacité à fonctionner pendant de longues périodes ;
- Comme fourniture d'énergie auxiliaire pour limiter la puissance de pointe absorbée sur le réseau d'énergie.

Les groupes électrogènes peuvent fonctionner à vitesse fixe comme à vitesse variable.

Les machines à aimants permanents et commutation électronique ont connu en effet des progrès continus, depuis le développement des aimants permanents en terres rares permet de construire des machines synchrones, à des coûts compétitifs, avec plusieurs pôles développant des couples mécaniques considérables, plusieurs qualités spécifiques participent au succès de

ces machines comme l'absence de contacts glissants permise par les aimants permanents et qui autorise une très grande variété de structure par le jeu d'implantations variées des aimants.



Figure I 9 Exemple de groupes électrogènes semi-industriels.

I.4.4 Eoliennes en fonctionnement autonome

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées. La variabilité et les fluctuations des ressources (vent) ainsi que les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières, qui ne sont pas forcément corrélées avec les ressources, constituent encore des limitations à une exploitation plus large.

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible. De ce fait, la plupart des systèmes éoliens isolés privilégient l'utilisation de générateurs asynchrones à cage de par leur faible coût, leur robustesse et leur standardisation [17], [18]. Ces derniers sont souvent associés à une batterie de condensateurs qui fournit la puissance réactive nécessaire à leur magnétisation.

Des générateurs synchrones sont également utilisés [19]. Ils offrent un bon couple massique et peuvent éventuellement s'affranchir de multiplicateur de vitesse. Néanmoins, leur utilisation est limitée essentiellement à cause de leur prix qui est plus élevé que celui des générateurs à induction de la même taille [20].

Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages.

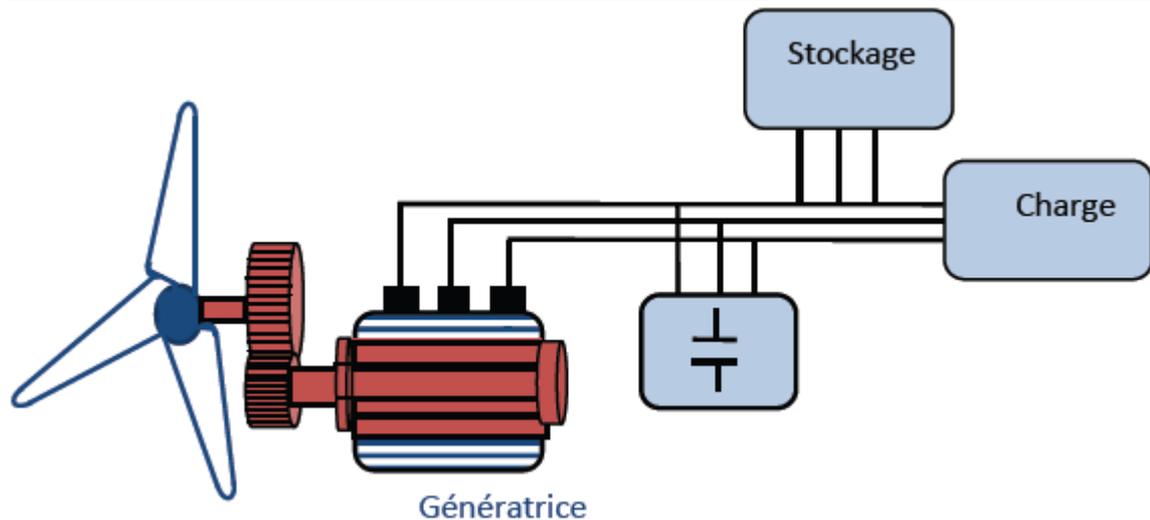


Figure I 10 Système éolien en fonctionnement autonome

I.5 Stockage de l'énergie éolienne

Le stockage de l'énergie électrique constitue une des composantes d'un futur développement durable, car il permettrait d'obtenir un service réseau appréciable c'est pour cela il faudra l'associer aux unités de production [21] [22].

Par ailleurs les moyens de stockage dépendent des conditions d'exploitations, Parmi ces moyens de stockage on cite:

I.5.1 Stockage électrochimique

Les accumulateurs électrochimiques représentent la solution qui a la plus grande maturité industrielle. Aujourd'hui, les batteries plomb-acide avancées ont été développées pour des applications de stockage dans les réseaux électriques. Elles présentent l'avantage de très bons rendements, un rapport prix/durée de vie et une bonne adaptation face aux fluctuations propres au vent. Par contre les batteries sont utilisées pour le stockage sur des temps courts.

I.5.2 Stockage inertiel

Cette forme de stockage à court terme est bien adaptée à une association d'un volant d'inertie avec des éoliennes, du fait de sa grande dynamique, de son bon rendement et de sa durée de vie.

I.5.3 Stockage magnétique

Il est utilisé dans des installations de petite taille, le stockage se fait à l'aide de bobinage supraconducteur. Son inconvénient est la nécessité de réfrigération ainsi un coût élevé. Il a été utilisé pour la stabilisation des réseaux (contrôle de P et Q) et pour améliorer la qualité du réseau.

I.5.4 Stockage hydraulique

Il est connu sous le nom: STEP « Station de Transfert d'Energie par Pompage». Est une technologie de stockage utilisée couramment dans les réseaux. Le rendement se situe entre 65 % et 75 %.

I.5.5 Le stockage thermique

Son principe consiste à chauffer de l'air ou un fluide à haute température qui peut être ensuite stocké dans une enceinte thermiquement isolée (EX: les ballons d'eau chaude).

I.6 Classification des machines électriques utilisées dans un système autonome

I.6.1 Machine synchrone [23]

I.6.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante.

I.6.1.2 Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent. Nous allons en donner une présentation succincte ci-dessous.

I.6.1.2.1 Structure avec redresseur à diodes

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure (I-11). Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal.

Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée.

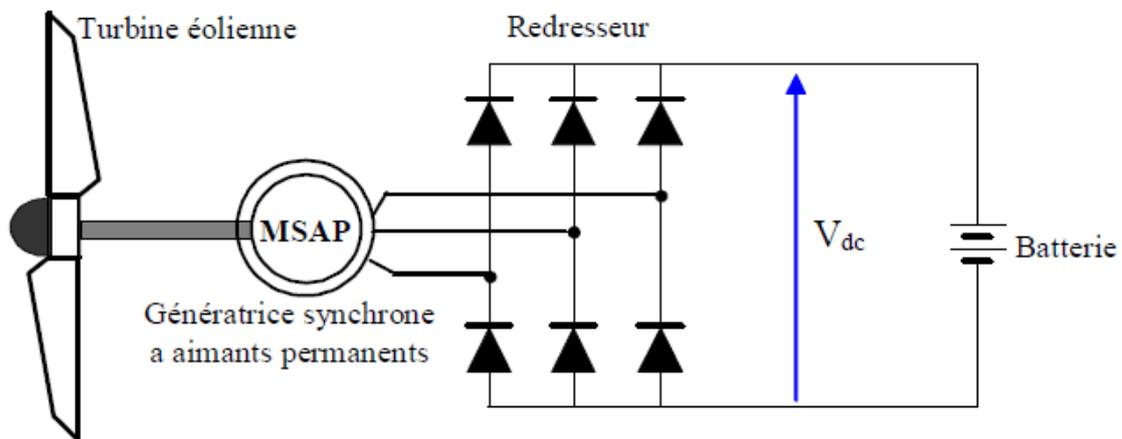


Figure I 11 Machine synchronisée avec redresseur à diodes

I.6.1.2.2 Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchronisée à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes (figure (I-12)).

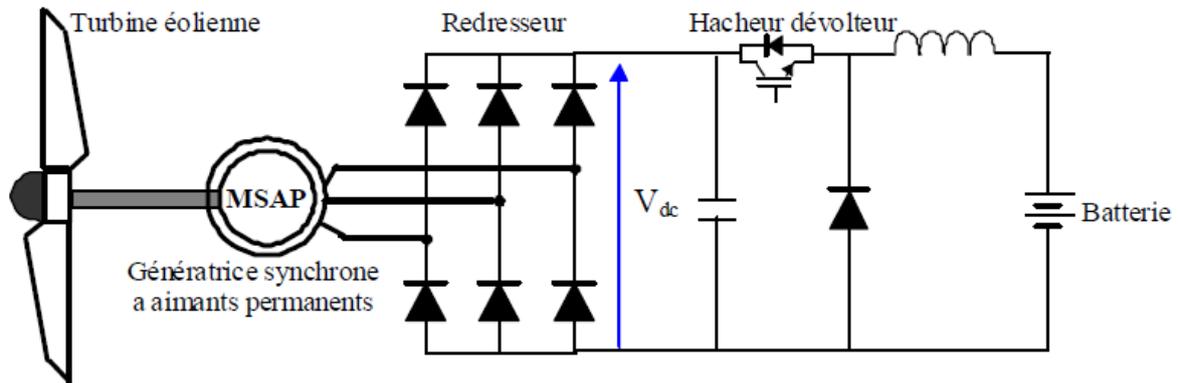


Figure I 12 Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur

I.6.1.2.3 Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T_1 et T_2 . Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées.

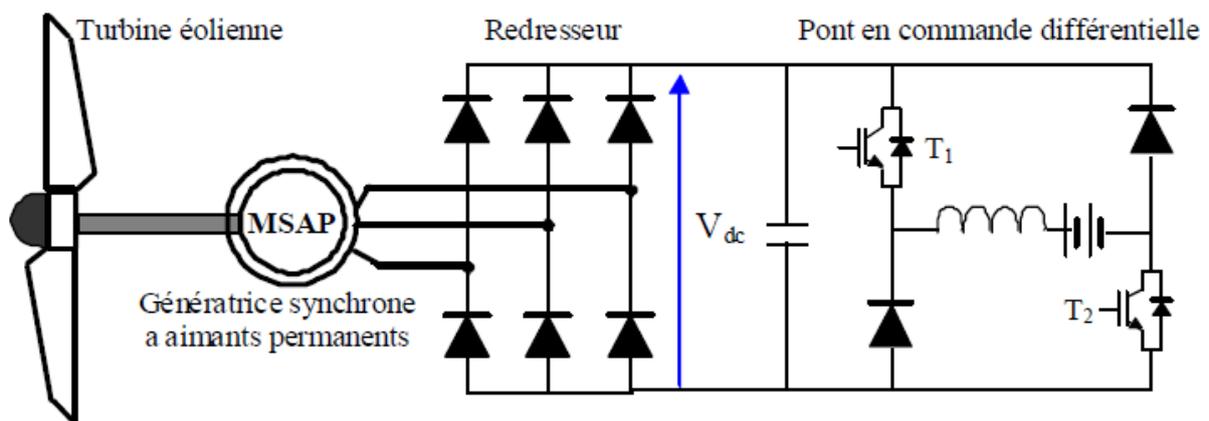


Figure I 13 Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont

I.6.1.2.4 Structure avec redresseur à MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure (I-14), il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation .

Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position.

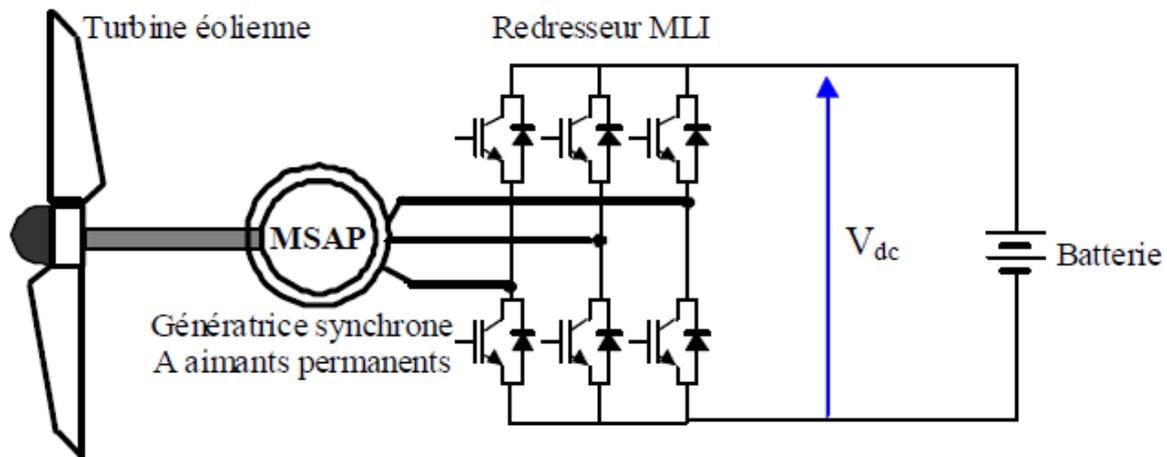


Figure I 14 Machine synchrones connectée à un redresseur à MLI

I.6.1.3 Machines à réluctance variable

Quelques travaux ont également concerné l'utilisation de la machine synchrones à réluctance variable pour des applications en conversion d'énergie éolienne.

Cette structure a un stator dont la structure et le bobinage sont similaires à ceux d'une machine asynchrone. Son rotor est saillant et peut être muni d'une cage d'écureuil qui permet d'assurer le démarrage direct sur le réseau et d'améliorer la stabilité de fonctionnement au synchronisme. Comme la machine asynchrone, cette structure absorbe de la puissance réactive pour sa magnétisation et dans sa version classique, son facteur de puissance est relativement faible qui limite son domaine d'application à quelques dizaines de kilowatts. Néanmoins, la cage d'amortisseurs n'étant pas obligatoire, son coût de fabrication peut être très attractif dans une utilisation en éolienne autonome.

Le fonctionnement générateur de cette structure est très proche de celui d'une machine asynchrone à cage. Par conséquent, elle peut être utilisée en autonome débitant sur un banc de capacités en parallèle à la charge (figure (I.15)) ou encore sur un redresseur à MLI.

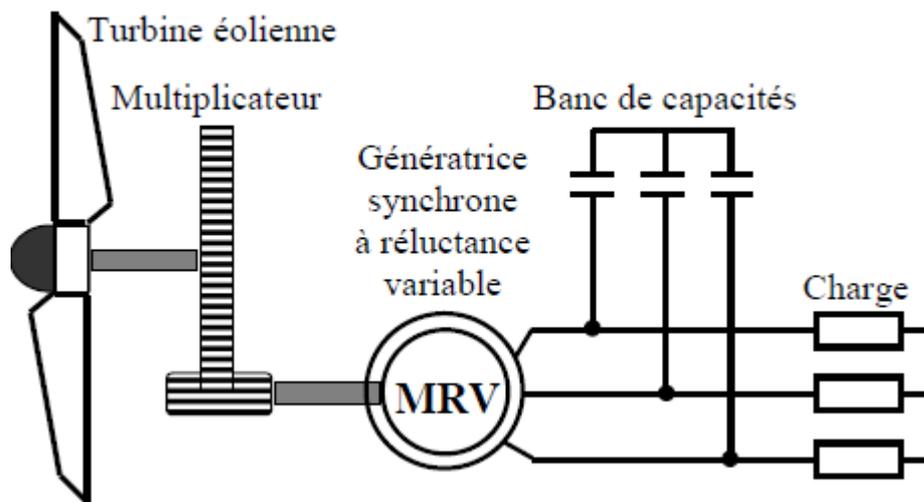


Figure I 15 Machine synchrone à réluctance variable connectée à un banc de capacités

I.6.2 Machines asynchrones à cage d'écurieil [23] [24]

La machine asynchrone à cage reste sans conteste celle qui est la plus largement répandue pour des applications en conversion éolienne autonome ou isolée et ce pour des raisons de robustesse et de prix. En effet, cette structure est démunie de contacts électriques par balais-collecteurs et d'aimants permanents ce qui lui confère une robustesse et une longévité sans égales et également un coût d'achat et d'entretien bien inférieur à celui d'un alternateur d'une même puissance. Enfin, elle est très tolérante à des régimes extrêmes de fonctionnement (survitesses, surcharges ... etc.).

Le revers de la médaille est constitué d'une tension dont l'amplitude et la fréquence sont, dans le cas d'un fonctionnement autonome, très sensibles aux variations de vitesses et de charges. Par ailleurs, comme mentionné précédemment, la génératrice asynchrone fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation, ce qui constitue son principal inconvénient. Afin d'éliminer ce dernier vis à vis de la machine synchrone, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature. Dans ce qui suit, nous donnons une synthèse de quelques systèmes permettant de fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la génératrice asynchrone et de stabiliser sa tension statorique. On trouve différentes structures des machines asynchrones :

I.6.2.1 Machine asynchrone auto-excitée par condensateurs fixes

L'utilisation de la machine asynchrone à cage connectée à des capacités a l'avantage de la simplicité de mise en œuvre et le faible coût dû à l'absence de convertisseurs statiques. Cependant, cette configuration admet des limites de fonctionnement qu'il faut prendre en

Chapitre I généralités sur les aérogénérateurs et les systèmes autonomes

compte, notamment les variations de l'amplitude et de la fréquence des tensions lors des variations de charge et de vitesse. Par ailleurs, il faut prendre des précautions et éviter de surcharger la machine au risque de la démagnétiser. Cela nécessiterait alors une intervention externe ou une phase de fonctionnement spécifique afin de la remagnétiser.

Il existe plusieurs configurations dans la littérature pour connecter les capacités aux bornes de la machine, d'où on site :

I.6.2.1.1 Machine asynchrone auto excitée par un seul condensateur fixe

Le bobinage de la machine étant connecté en étoile ou en triangle. Dans le cas où la machine est connectée en étoile, la capacité d'excitation peut être branchée entre une phase et le neutre comme elle peut être branchée entre deux phases.

Dans le cas du triangle, La capacité d'excitation est branchée entre deux bornes du triangle. La charge est monophasée et elle peut être branchée en parallèle avec la capacité (figure (I-16.a)) ou entre l'une des deux bornes où la capacité est branchée et la borne restante du triangle (figure (I-16.b)).

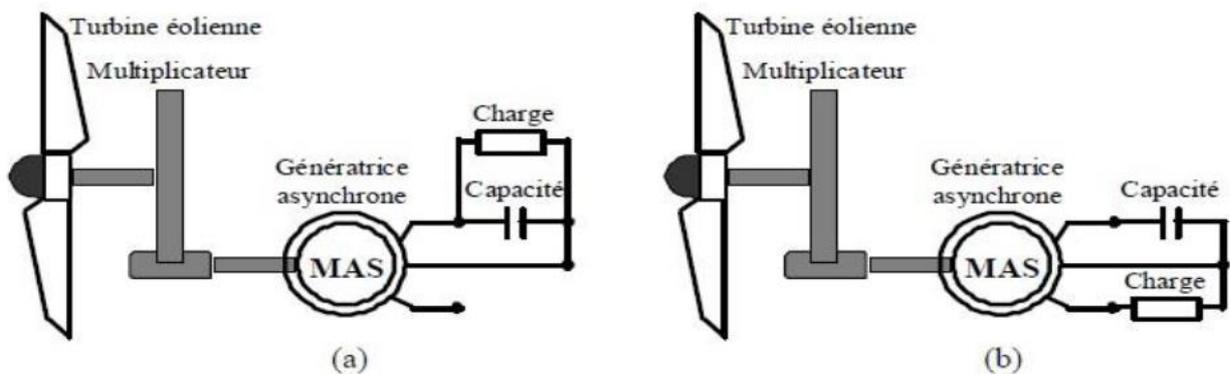


Figure I 16 Machine asynchrone auto-excitée avec un seul condensateur

I.6.2.1.2 Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes

Dans cette configuration, les bobinages statoriques de la machine asynchrone sont connectés à un banc de capacités en parallèle à la charge (figure I.17)

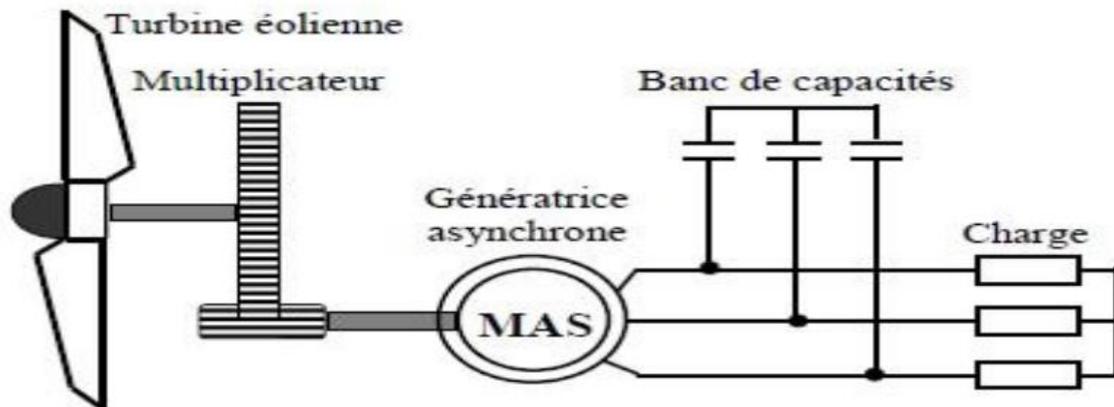


Figure I 17 Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs

I.6.2.2 Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes avec un système de compensation

L'utilisation d'un banc de capacités fixes ne permet pas de maîtriser le flux de puissance réactive et par conséquent maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension délivrée constantes lors de variations de charge ou de vitesse du vent. Pour surmonter cet inconvénient, tout en gardant un banc de capacités d'auto excitation, plusieurs solutions ont été envisagées.

I.6.2.2.1 Capacités de compensation en série

La structure la plus couramment utilisée consiste à connecter, en plus des capacités parallèles, d'autres capacités en série avec la charge ou avec le stator de la machine. Cette approche permet de diminuer la chute de tension en charge mais elle limite les possibilités d'une régulation continue de la tension sur une large gamme de charges et/ou de vitesses. La figure (I-18) présente une compensation où les capacités sont en série avec la charge

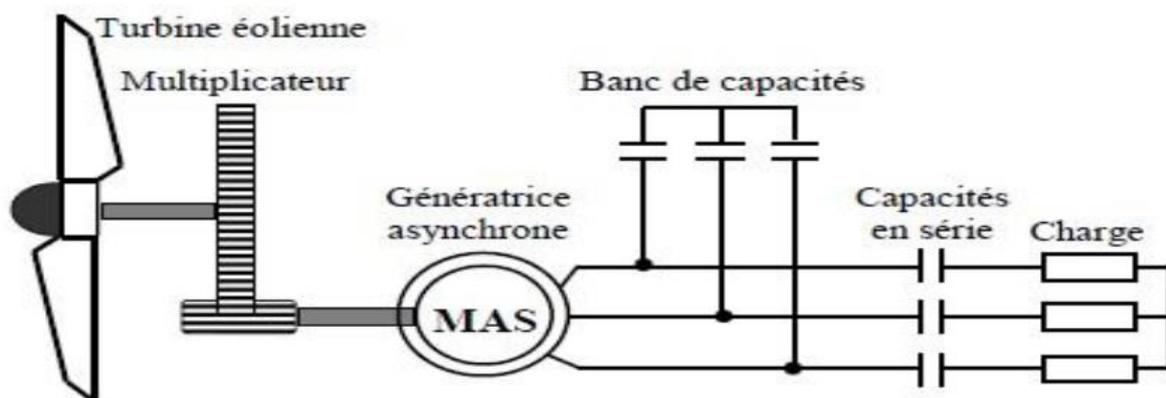


Figure I 18 Machine asynchrone auto-excitée avec compensation série

I.6.2.2.2 Batterie de condensateurs commandés

Une autre solution, basée sur le concept de contrôle continu de la capacité d'excitation. Il s'agit d'un dispositif constitué de capacités fixes en parallèle avec des interrupteurs GTO montés en tête bêche figure (I-19). La valeur apparente de la capacité peut être alors ajustée périodiquement par le contrôle du temps durant lequel la capacité est connectée au circuit.

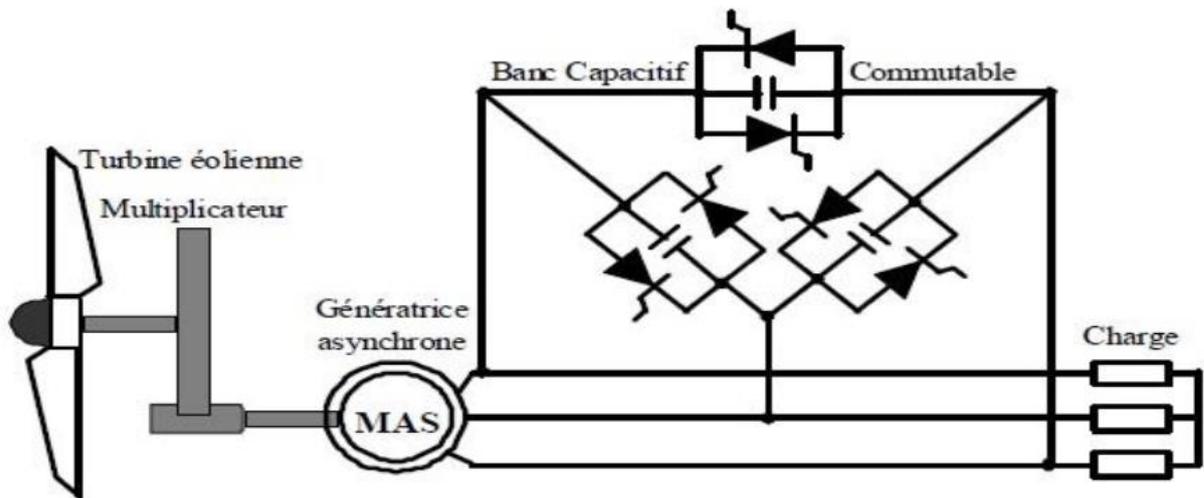


Figure I 19 Machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs et gradateur

Ce dispositif se comporte comme un condensateur variable, de façon à créer une source d'énergie réactive variable permettant d'atténuer les variations de tensions lors de perturbations de la vitesse du vent ou de la charge. Cependant, en cas de décharge totale du dispositif de stockage, il ne peut plus y avoir production d'énergie.

I.6.2.2.3 Générateurs de puissance réactive

Des solutions plus efficaces, mais complexes, ont été proposées sous formes de générateurs statiques d'énergie réactive (static VAR generator). Ces derniers utilisent des structures à base d'électronique de puissance afin de maintenir la tension constante, tels que les réactances commandées par thyristors (TCR), les capacités commutées par thyristor (TSC) et aussi le compensateur statique (STATCOM).

Tous les systèmes à base de l'électronique de puissance cités auparavant offrent des résultats satisfaisants en termes de régulation de la tension mais leurs inconvénients résident dans leur complexité de mise en œuvre et leur coût élevé.

I.6.2.3 Configuration avec convertisseur unidirectionnel (redresseur à diodes ou mixte)

Dans cette configuration les convertisseurs d'énergie sont un redresseur de type PD3 et un hacheur de type survolteur/dévolteur. Ce montage (figure I-20), permet d'asservir la tension de sortie à la valeur souhaitée avec une dynamique satisfaisante et avec une commande caractérisée par sa simplicité de réalisation et son faible coût. Mais il ne permet pas de contrôler la magnétisation de la machine et son coût global reste élevé à cause des capacités introduites pour la magnétisation et l'utilisation de deux convertisseurs et un système de filtrage.

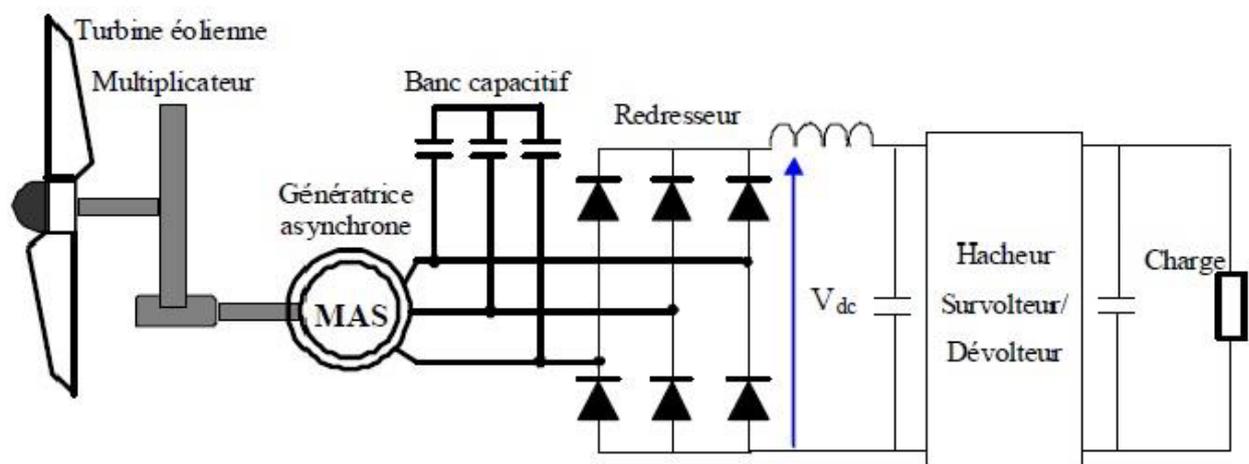


Figure I 20 Structure avec pont à diodes et hacheur

I.6.2.4 Configuration avec convertisseurs bidirectionnels (convertisseurs à MLI).

La structure représentée dans la figure (I-21) est constituée d'une génératrice asynchrone connectée à un redresseur et un onduleur de tension à MLI.

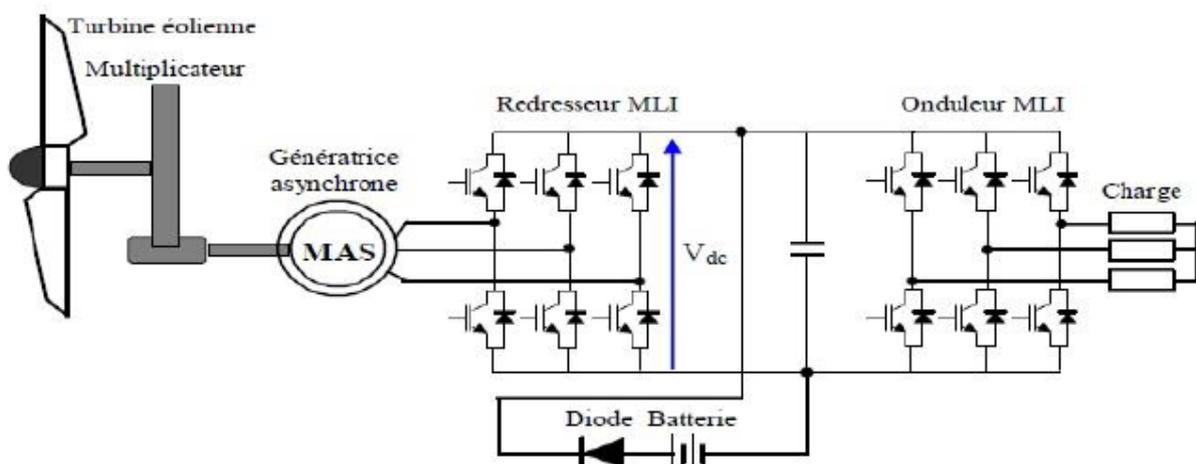


Figure I 21 Structure à base de deux convertisseurs MLI

Cette configuration permet le contrôle, par une commande adaptée, de la magnétisation et de la tension à la sortie de la génératrice asynchrone lorsque la vitesse du rotor et la charge électrique sont variables. L'inconvénient majeur de cette architecture demeure le coût élevé et la complexité de la commande.

I.7 Machines multiphasées

Les machines triphasées à courant alternatif dominant assez largement le domaine des machines électriques, mais depuis longtemps déjà on s'intéresse aux machines ayant un nombre de phases supérieur à trois. Ces machines sont souvent appelées « machines à grand nombre de phases » ou « machines multiphasées » [15].

➤ Caractéristiques des machines multi-phasées

Suivant le nombre de phases qu'on peut avoir dans le stator (les phases statorique) qui est un nombre multiple de trois, on distingue deux types :

- **machines multi-phasées de type1 :**

Dans ce type de machines le nombre de phases statoriques est un multiple de trois, on peut les grouper en η étoile triphasées $q=3\eta$ $\eta=(1, 2,3\dots)$.

- **Machines multi-phasées de type2**

Les machines multiples de type2 dont le nombre de phases statorique (q) impaire $q=2\eta+1$ ($\eta=1, 2,3\dots$). Pour le décalage angulaire α entre deux bobines adjacentes, les phases sont décalées régulièrement de $2\alpha = \frac{2\pi}{q}$ Alors on a : $q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha}$.

I.8 Quelques technologies de commande et applications de la GASDE

Dans une application (production d'énergie renouvelable autonome), lorsque la GASDE est auto-excité par six condensateurs, la tension du générateur s'effondre quand il est surchargé soit avec courte ou longue connexion d'excitation shunt, le générateur est en mesure de maintenir la charge à une tension de fonctionnement inférieure et à un fort courant et cela en utilisant la méthode d'algorithme génétique [25].

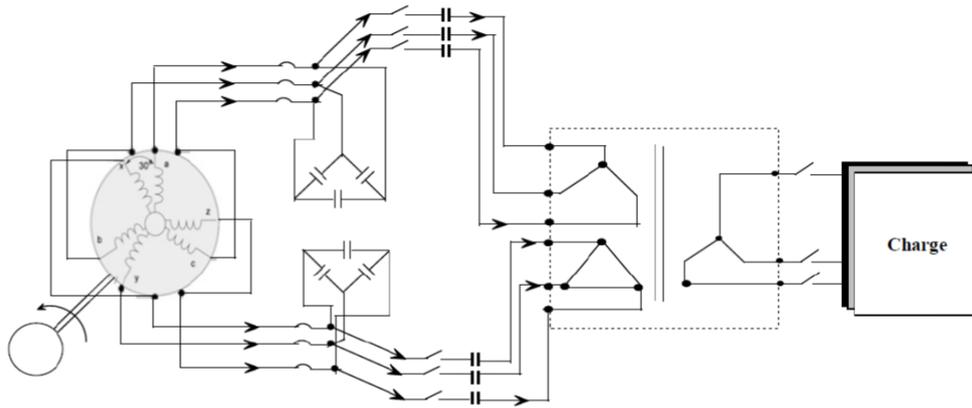


Figure I 22 Schéma de principe du système de générateur de six phases auto-excité [25]

Une représentation schématique est donnée Fig.(I-23) Les grandeurs relatives aux deux étoiles seront notées par les indices (1) et (2).

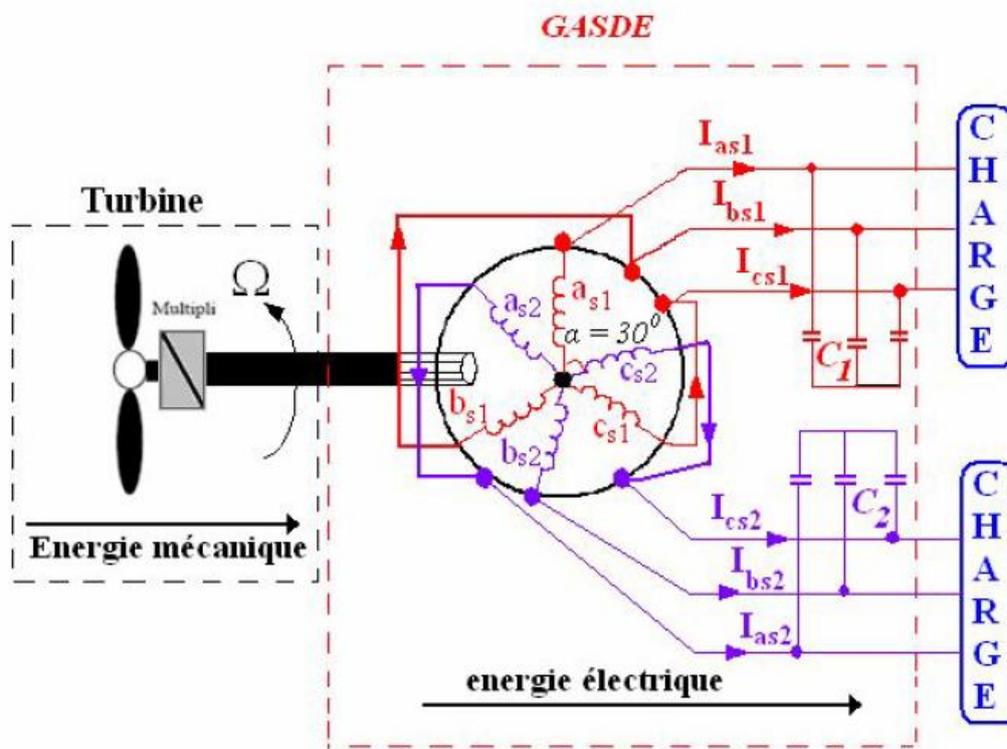


Figure I 23 Système de conversion éolienne basé sur la GASDE [26]

Le système dans la (figure I.24) présente un nouveau type de la MASDE fonctionnant en mode générateur. Le principal avantage de la GASDE est l'amélioration de sa capacité à fonctionner à des petites vitesses variables pour les éoliennes ou les hydroliennes [25].

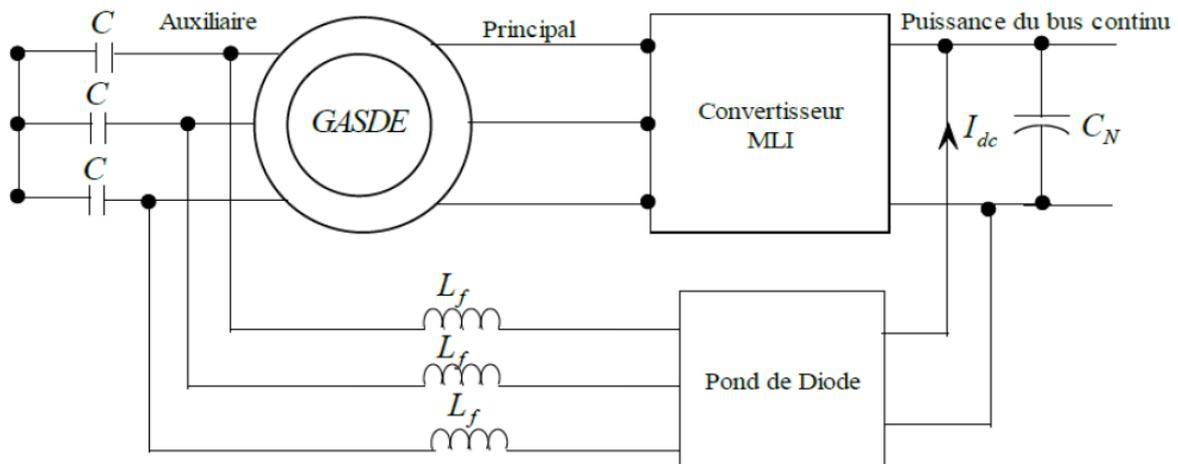


Figure I 24 Solution pour des éoliennes à vitesse variable ou hydro système de conversion d'énergie[25]

L'enroulement de commande de la GASDE est connecté à un onduleur ; ce dernier permet le contrôle du besoin en puissance réactive du générateur (avec une vitesse ou une charge variable), ce qui rend la tension stable à la sortie. Les performances du système avec la variation de vitesse à vide et à charge nominale sont simulées à partir du contrôle direct du flux statorique de l'enroulement de commande. L'onduleur de puissance peut être utilisé pour contrôler les grandes puissances et réduit le coût, le volume et le poids rentablement (figure I.25) [25].

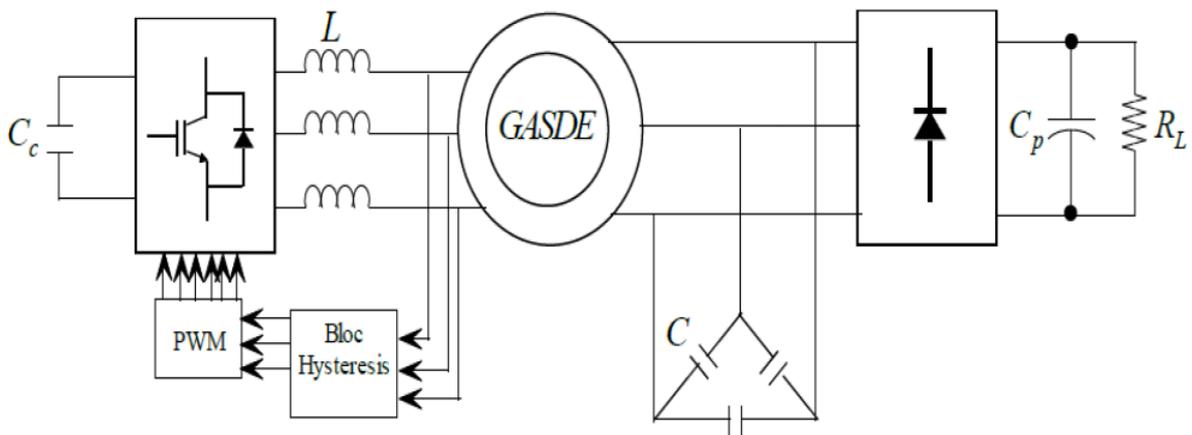


Figure I 25 Solution pour des éoliennes à vitesse variable ou hydro système de conversion d'énergie

I.9 Avantages et inconvénients des machines polyphasées ou multi étoiles [25]

I.9.1 Avantages

➤ Elimination d'harmoniques d'espace

Plus la valeur de q_α (nombre équivalent de phase dont $(q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha})$ est grande, plus les rangs des premiers harmoniques d'espace existants sont élevés. Ces derniers sont ceux de rang dix-sept et dix-neuf pour la machine à neuf phases par exemple. On peut ainsi éliminer les harmoniques cinq et sept, responsables d'un creux au voisinage du septième de la vitesse synchrone, dans la caractéristique couple/vitesse de certaines machines triphasées. Remarquons également que, à nombre d'encoches donné, plus le nombre de phases augmente, plus le nombre d'encoches par pôles et par phase diminue. Ceci augmente le facteur de distribution pour le fondamental. A courant donné, on augmente donc l'amplitude du fondamental de la f. m. m, comparée au cas de la machine triphasée.

➤ Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques

Dans une machine triphasée, l'ondulation du couple électromagnétique dont la fréquence est six fois celle du fondamental est principalement créée par les harmoniques cinq et sept de temps. Or dans une machine double étoile, ces harmoniques ne créent pas de f.m.m, l'harmonique de couple de rang six est donc éliminé.

Cette propriété des machines multiphasées à éliminer les harmoniques de couple de rang faible est aussi un avantage certain. On remarque aussi que, puisque certaines harmoniques de courants statoriques ne créent pas de f. m. m, alors les courants peuvent être induits au rotor. Par conséquent, une machine multiphasée aura pratiquement toujours moins de pertes rotoriques qu'une machine triphasée.

➤ Segmentation de puissance

A puissance donnée, lorsqu'on augmente le nombre de phases, on diminue le courant par phase sans augmenter la tension par phase. La puissance totale est donc répartie sur un nombre plus important de phases, la puissance demandée par chacune d'elles est alors réduite. Ainsi, l'alimentation de la machine par onduleur peut se faire avec des composants de puissance de calibre inférieur, pouvant fonctionner à des fréquences de commutation plus élevées. Cela permet de minimiser les ondulations de courants et de couple.

Chapitre I généralités sur les aérogénérateurs et les systèmes autonomes

➤ Amélioration de la fiabilité

La fiabilité de la machine polyphasée est plus élevée que celle de la machine triphasée, car l'augmentation de nombre de phases va donner pour le système une fonction risque très petite que celle de la machine triphasée. Même si un des enroulements ou un des deux onduleurs soit hors d'usage pour une raison quelconque, le moteur a la possibilité de continuer à tourner avec l'autre enroulement. Cette caractéristique revêt un grand intérêt dans certaines applications (traction navale, traction ferroviaire, etc.).

I.9.2 Inconvénients

La machine asynchrone présente des inconvénients tels que:

- Le nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases, ce qui peut éventuellement augmenter le coût de l'ensemble convertisseur- machine.
- La multiplication du nombre des semi-conducteurs avec la structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux, ce qui complique évidemment sa commande.
- L'inconvénient majeur des machines double étoile est l'apparition de courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension.

I.10 Conclusion

Ce chapitre a pour objet de présenter des généralités sur les systèmes éoliens, ce qui nous a permis de déduire que la production d'énergie éolienne est de plus en plus importante.

Nos travaux étant centrés sur l'utilisation de la conversion de l'énergie éolienne pour des systèmes autonomes, la dernière partie de ce chapitre a été consacrée à introduire les différentes solutions utilisées dans ce cadre, nous avons présenté les architectures utilisées pour assurer ce fonctionnement tout en expliquant les différentes variantes et donnant les avantages et inconvénients de chacune d'elles.

Compte tenu des recherches récentes sur la machine asynchrone polyphasée ou multi étoile et vu ses avantages, il est très intéressant de pouvoir étudier cette dernière qui sera l'un des objectifs du chapitre suivant où on décrit le modèle de simulation du la MASDE.

Chapitre II



*Modélisation des
différentes parties du
système étudié*

II.1 Introduction

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne présentée dans ce chapitre, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Dans le cadre de notre travail, une modélisation du système éolien basé sur une machine à double étoile sera présentée.

En premier lieu, on s'intéresse qu'à la partie mécanique de l'éolienne avec les différents organes qui le composent : la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la génératrice ainsi le profil de vent que nous devons utiliser.

La seconde partie, est consacré à la modélisation de différentes parties de notre système électrique en commençant par la machines asynchrone double étoile, ensuite l'onduleur MLI et le bus continue, enfin on termine par donner les résultats des simulations et leurs interprétations.

II.2 Description du système étudié

II.2.1 Modélisation du système éolien

II.2.1.1 Zones de fonctionnement d'une éolienne [25]

La puissance maximale qui peut être produite (captée) par une éolienne présente sa puissance nominale. La vitesse du vent pour laquelle la puissance nominale de l'éolienne est atteinte est appelée vitesse nominale du vent v_n . Au-dessus de celle-ci, la production de la puissance reste constante quel que soit la vitesse du vent jusqu'à atteindre une vitesse maximale, appelée vitesse maximale de fonctionnement v_{max} , à laquelle l'éolienne est conçue pour s'arrêter afin de protéger ses parties mécanique des effets néfastes des grandes vitesses du vent. La vitesse du vent la plus basse à laquelle une éolienne fonctionnera est connue comme la vitesse de seuil v_s . Entre v_s et v_n , la production de la puissance varie avec la vitesse du vent, comme il est illustré sur la (figure II.1).

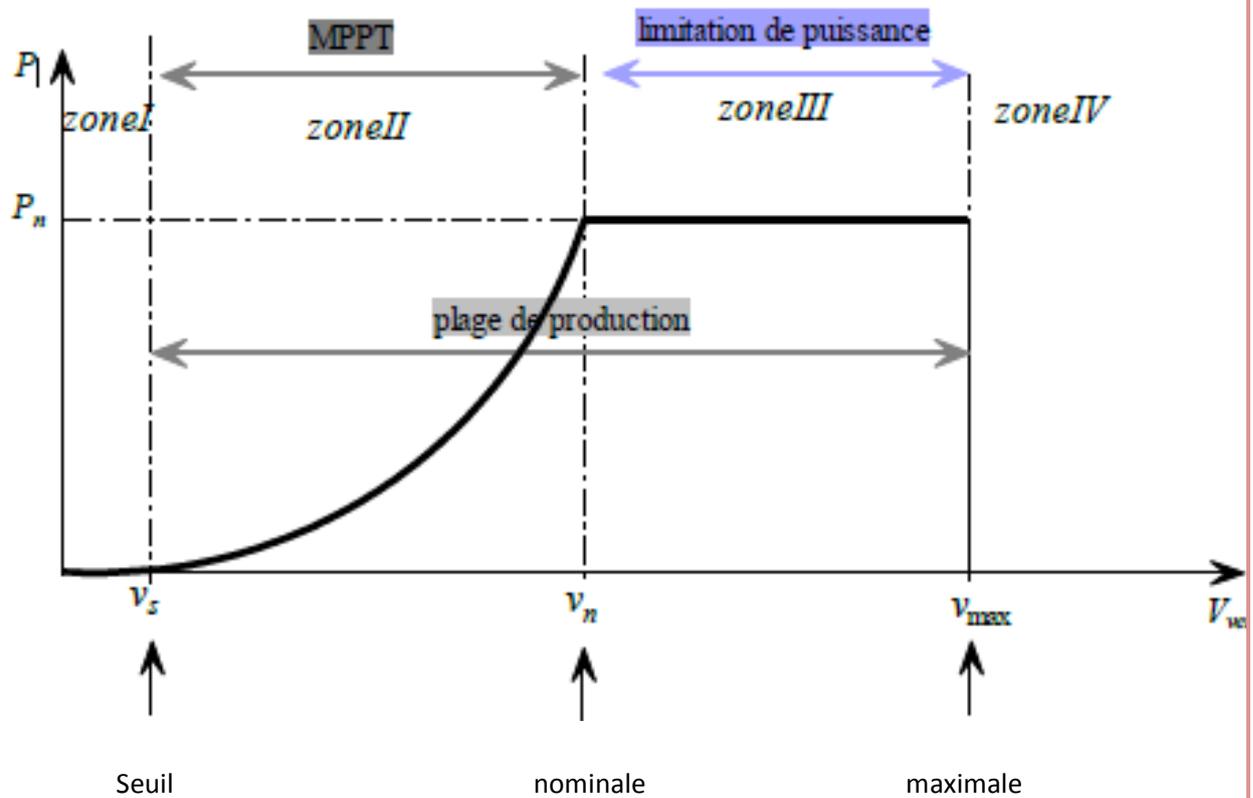


Figure II 1 Zones de fonctionnement d'une éolienne typique

- La zone I : C'est la zone de démarrage de la machine, elle finit lorsque la vitesse du vent atteint la vitesse seuil ;
- La zone II : Lorsque la vitesse de du vent atteint une valeur seuil v_s , un algorithme de commande est appliqué pour extraire le maximum de puissance, l'angle d'orientation de pale est maintenu constant ($\beta=0$), ce processus continu jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse v_n ;
- La zone III : Arrivée à la puissance nominale P_n , il est donc nécessaire de limiter la puissance captée par la turbine ;
- La zone IV : Au-delà de la vitesse v_{max} , pour des raisons de tenu mécanique il convient de déconnecter l'éolienne. La turbine est alors arrêtée et la puissance est nulle.

II.2.1.2 Modélisation de la turbine

La turbine constitue le 1er étage de conversion. Elle est équipée le plus souvent de trois Pâles de longueur R qui permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse v de gain G (Fig. II.2).

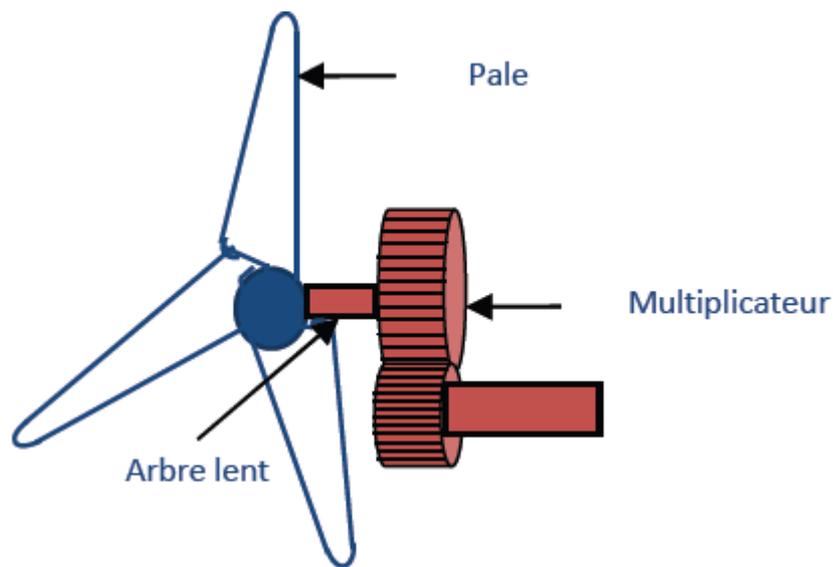


Figure II 2 Turbine éolienne

Le modèle de la turbine permet de déterminer la puissance extraite par cette dernière en fonction de la vitesse du vent, de sa vitesse de rotation et de la position de l'angle de calage des pales. Il sera ainsi possible de déduire le couple appliqué par la turbine sur l'arbre lent de l'éolienne et décrire le coefficient de puissance de la turbine. L'aéro-turbine transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, le multiplicateur de vitesse de gain G permet à la fois de diminuer le couple et d'augmenter la vitesse de rotation.[27][28]

II.2.1.3 Modèle aérodynamique des pales

La puissance qui peut être récupérée est décrite par l'équation :

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

ρ : est la densité de l'air (approximativement 1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C)

S : est la surface circulaire balayée par la turbine

v : est la vitesse de vent.

La puissance du vent n'est pas totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est inférieure à celle du vent, dans le cas où l'angle de calage des pales $\beta=0^\circ$.

L'expression de la puissance mécanique P_t captée par la turbine est donnée par :

$$P_t = C_p(\lambda) P_{ven} \quad (\text{II.2})$$

Chapitre II Modélisation des différentes parties du système étudié

$C_p(\lambda)$: Appelé coefficient de performance ou coefficient de puissance.

La vitesse relative λ est définie comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_T}{v_{vent}} \quad (\text{II.3})$$

(Où Ω_t (rad/s) est la vitesse mécanique de l'arbre de la turbine.

R_T : Le rayon de des pales

Le couple exercé par le vent sur l'arbre de la turbine (ou couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho S v_{vent}^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II.4})$$

II.2.1.4 Modèle de multiplicateur

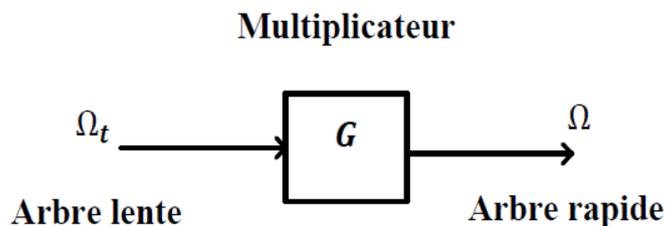


Figure II 3 Modèle du multiplicateur

Les vitesses mécaniques de la turbine et celle de la génératrice sont liées par le gain du multiplicateur G comme le montre l'équation (II.5)

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.5})$$

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

$$C_r = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.6})$$

II.3 Description de la machine asynchrone double étoile

La MASDE se compose d'un stator portant deux enroulements triphasés identiques et décalés d'un angle électrique ($\alpha = 30^\circ$), et d'un rotor à cage d'écureuil. La figure (II.4) représente schématiquement les enroulements de la MASDE. Les angles (θ_r) et ($\theta_r - \alpha$)

représentent respectivement la position du rotor (phase a_r) par rapport à l'étoile 1 (phase a_{s1}) et à l'étoile 2 (phase a_{s2}). Les grandeurs relatives aux deux étoiles (1 et 2) seront notées respectivement par les indices 1 et 2.

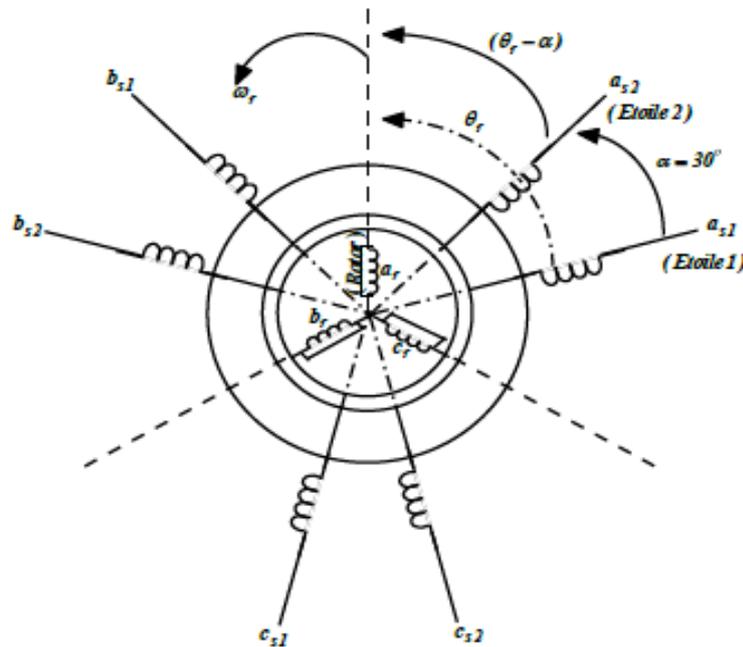


Figure II 4 Représentation schématique des enroulements de la MASDE [25]

Le système global étudié est constitué d'une GASDE, deux onduleur/redresseur et d'une charge. Le schéma global du système est représenté sur la figure (III.5)

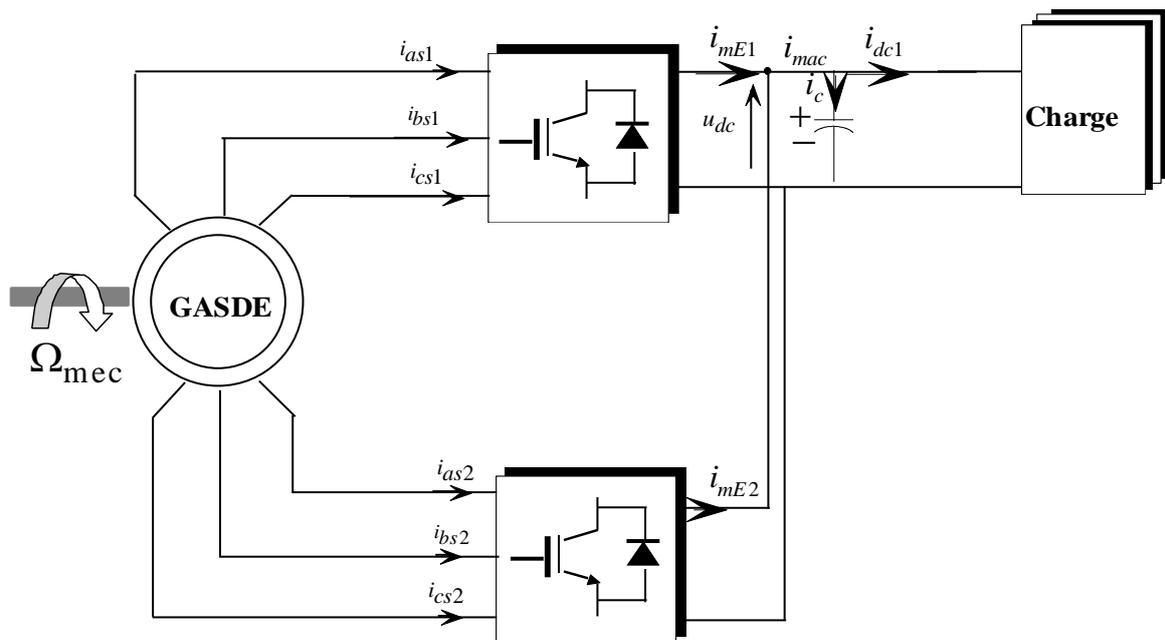


Figure II 5 Schéma global du système étudié

II.4 Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile**II.4.1 Hypothèses Simplificatrices :**

Pour écrire les équations traduisant le fonctionnement de la MASDE, en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes [29] :

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants et on néglige l'effet d'hystérésis ;
- La construction de la machine est supposée homogène c'est-à-dire ; la longueur de l'entrefer est constante ;
- Nous admettons de plus que la force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température ;
- On admettra que les deux enroulements triphasés statoriques sont équilibrés et identiques.

L'écriture des équations des tensions des phases des deux enroulements du stator et du rotor sont données comme suit :

II.4.2 Équations générales de la machine :**II.4.2.1 Equations électriques de la MASDE**

Les équations des tensions de la MASDE représentent pour chaque enroulement la somme des chutes ohmique et inductive due au flux.

$$\text{Pour l'étoile 1 : } \begin{cases} V_{as1} = R_{s1} I_{as1} + \frac{d\varphi_{as1}}{dt} \\ V_{bs1} = R_{s1} I_{bs1} + \frac{d\varphi_{bs1}}{dt} \\ V_{cs1} = R_{s1} I_{cs1} + \frac{d\varphi_{cs1}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Pour l'étoile 2 : } \begin{cases} V_{as2} = R_{s2} I_{as2} + \frac{d\varphi_{as2}}{dt} \\ V_{bs2} = R_{s2} I_{bs2} + \frac{d\varphi_{bs2}}{dt} \\ V_{cs2} = R_{s2} I_{cs2} + \frac{d\varphi_{cs2}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Chapitre II Modélisation des différentes parties du système étudié

$$\text{Pour le rotor} \quad \begin{cases} V_{ar} = R_r I_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} = 0 \\ V_{br} = R_r I_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} = 0 \\ V_{cr} = R_r I_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

La forme matricielle est la suivante :

$$\text{Pour l'étoile 1 : } [V_{s1}] = [R_{s1}] [I_{s1}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s1}] ;$$

$$\text{Pour l'étoile 2 : } [V_{s2}] = [R_{s2}] [I_{s2}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s2}] ;$$

$$\text{Pour le rotor : } [V_r] = [R_r] [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] .$$

$$\text{Avec : } [V_{s1}] = \begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{bmatrix} ; [V_{s2}] = \begin{bmatrix} V_{as2} \\ V_{bs2} \\ V_{cs2} \end{bmatrix} ; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}$$

$[V_{s1}]$: Matrice de tension de l'étoile 1 ;

$[V_{s2}]$: Matrice de tension de l'étoile 2 ;

$$[I_{s1}] = \begin{bmatrix} I_{as1} \\ I_{bs1} \\ I_{cs1} \end{bmatrix} ; [I_{s2}] = \begin{bmatrix} I_{as2} \\ I_{bs2} \\ I_{cs2} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$$

$[I_{s1}]$: Matrice de courants de l'étoile 1 ;

$[I_{s2}]$: Matrice de courants de l'étoile 2 ;

$[I_r]$: Matrice de courants du rotor.

$$[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{as1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs1} \end{bmatrix} ; [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{as2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs2} \end{bmatrix} ;$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix}$$

Où :

$$R_{as1} = R_{bs1} = R_{cs1} ; R_{as2} = R_{bs2} = R_{cs2} ; R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r$$

$$[\varphi_{s1}] = \begin{bmatrix} \varphi_{as1} \\ \varphi_{bs1} \\ \varphi_{cs1} \end{bmatrix}; [\varphi_{s2}] = \begin{bmatrix} \varphi_{as2} \\ \varphi_{bs2} \\ \varphi_{cs2} \end{bmatrix}; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

$[\varphi_{s1}]$: Matrice de flux de l'étoile 1 ;

$[\varphi_{s2}]$: Matrice de flux de l'étoile 2 ;

$[\varphi_r]$: Matrice de flux de rotor.

II.4.2.2 Equations magnétiques de la MASDE

Les équations des flux statoriques (étoiles 1 et 2) et rotoriques en fonction des courants sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{s1} \\ \varphi_{s2} \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Les sous matrices de la matrice des inductances sont

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_{s2}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s1} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} (L_{s2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s2} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} (L_r + L_{mr}) & L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_r + L_{mr}) & L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_r + L_{mr}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s1,s2}] = \begin{bmatrix} L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s1,r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s2,r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix}$$

Les sous matrices $[L_{s2,s1}] = [L_{s1,s2}]^t$, $[L_{r,s1}] = [L_{s1,r}]^t$, $[L_{r,s2}] = [L_{s2,r}]^t$.

Avec : $L_{ms} = L_{mr} = L_{sr} = \frac{2}{3} L_m$.

L_{s1} : L'inductance propre de la stator1 ;

L_{s2} : L'inductance propre de la stator2 ;

L_r : L'inductance propre d'une phase du rotor ;

L_{ms} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique ;

L_{mr} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique ;

L_{sr} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre une étoile et le rotor.

II.4.2.3 Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle d'énergie électromagnétique stockée par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

$$C_{em} = \frac{\partial W}{\partial \theta} = \frac{\partial W}{\partial \theta_{geo}} p \quad (II.11)$$

Avec :

$$W = \frac{1}{2} ([I_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [I_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [I_r]^t [\varphi_r]) \quad (II.12)$$

Chapitre II Modélisation des différentes parties du système étudié

Le couple électromagnétique est donné par l'expression(II.13)

$$C_{em} = \frac{P}{2} ([I_{s1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1r}] [I_r]^t + [i_{s2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2r}] [I_r]^t) \quad (\text{II.13})$$

II.4.2.4 Equation mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + K_f \Omega_{mec} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$\Omega_{mec} = \frac{\omega_r}{p};$$

J : Inertie totale des parties tournante, constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice.

K_f : Coefficient de frottement.

II.4.3 Modèle biphasé de la MASDE

II.4.3.1 Transformation de Park

Le principe de la transformation de Park consiste à remplacer les grandeurs (courant, tension et flux) d'indices réelles a, b, c par des grandeurs d'indices d, q, 0 (direct, en quadrature et homopolaire) à l'aide de la matrice de Park $[p(\theta)]$.

On transforme le système triphasé au système biphasé tournant.

La matrice de Park pour l'étoile 1 est définie comme suit :

$$[P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

La matrice de Park pour l'étoile 2 est définie comme suit :

Chapitre II Modélisation des différentes parties du système étudié

$$[P(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

La matrice de Park pour le rotor est définie comme montré par l'équation(II.17)

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

Avec :

$[P(\theta_{s1})]$: Matrice de transformation du premier enroulement statorique (étoile1) ;

$[P(\theta_{s2})]$: Matrice de transformation du deuxième enroulement statorique (étoile2) ;

$[P(\theta_r)]$: Matrice de transformation d'enroulement rotorique.

II.4.3.2 Modèle de la MASDE selon le système d'axes (d, q)

Le choix de cet axe est lié à son immobilité par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques

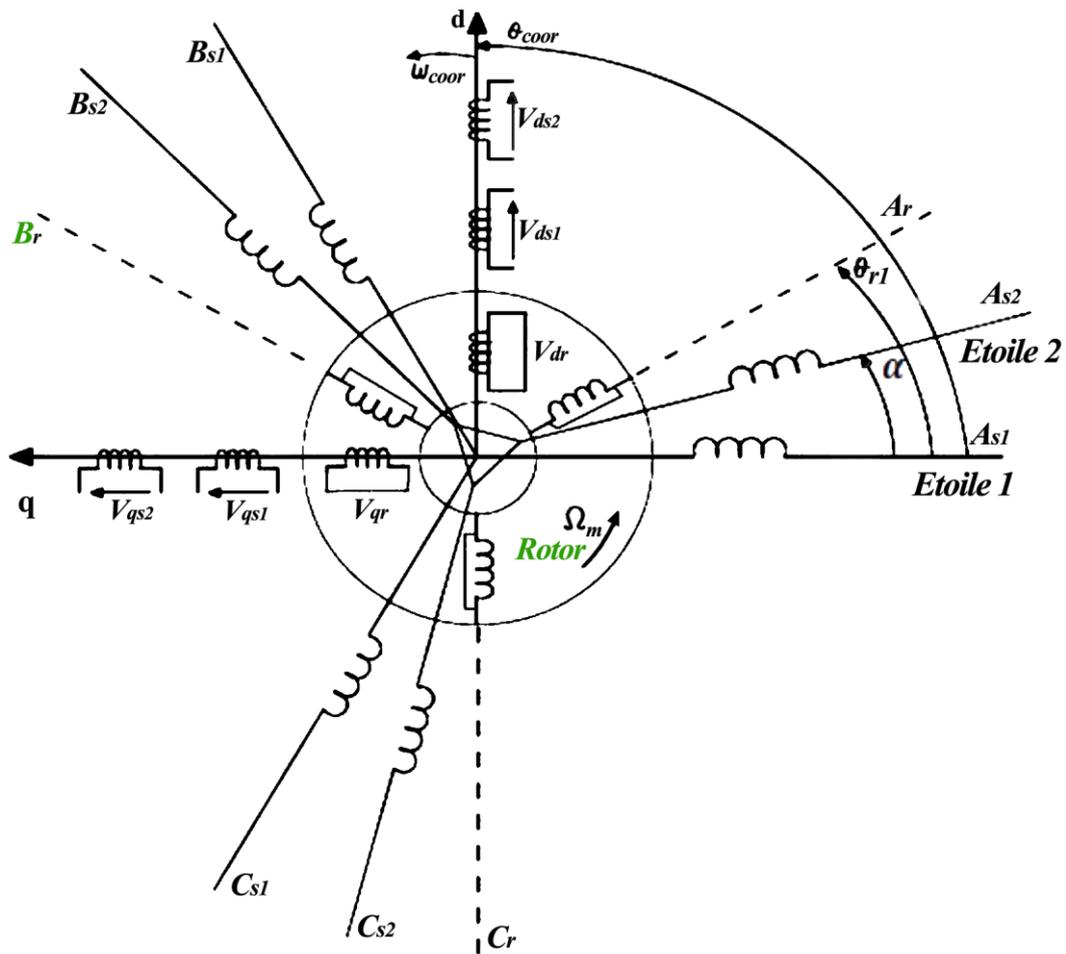


Figure II 6 Schéma d'enroulements de la MASDE dans les axes d,q [30].

II.4.4 Choix du référentiel

Trois types de référentiels existent dans la pratique, le choix se fait selon le problème à étudier.

II.4.4.1 Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, on a :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \text{ où } \theta_s = \theta_r + \theta$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \theta_s = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt}$$

D'où :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\rho\Omega_{mec}$$

Ce référentiel est utilisé dans l'étude des régimes transitoires avec une variation importante de la vitesse de rotation.

II.4.4.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, on a :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \rho\Omega_{mec}$$

Ce référentiel est utilisé dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée constante.

II.4.4.3 Référentiel lié au champ tournant

Dans celui-ci, on a :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \rho\Omega_{mec}$$

Ce référentiel n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électriques.

Dans cette étude le modèle a été exprimé dans le repère (d, q) lié au champ tournant

II.4.5 Modèle biphasé de la MASDE lié au système d'axes (d, q)

L'écriture du modèle de la MASDE dans un repère biphasé lié au champ tournant est obtenue en utilisant les transformations de Park permettant la conservation de la puissance. En appliquant ces transformations aux tensions ainsi qu'aux flux statoriques, nous obtenons le modèle électrique classique suivant [25] :

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1}I_{ds1} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds1} - \omega_s \varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1}I_{qs1} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs1} + \omega_s \varphi_{ds1} \\ v_{ds2} = R_{s2}I_{ds2} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds2} - \omega_s \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}I_{qs2} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs2} + \omega_s \varphi_{ds2} \\ v_{dr} = 0 = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_{gl} \varphi_{qr} \\ v_{qr} = 0 = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_{gl} \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Où :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r .$$

Les composantes des flux statoriques et rotoriques s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1}I_{ds1} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \varphi_{qs1} = L_{s1}I_{qs1} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \varphi_{ds2} = L_{s2}I_{ds2} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}I_{qs2} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

$$\rho\Omega_{mec} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r$$

En introduisant le système d'équations (II.18) dans (II.19) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

$$[B][U] = [L][i] + \omega_{gl}[C][I] + [D][I]$$

(II.20)

Où :

$[u] = [v_{ds1}, v_{qs1}, v_{ds2}, v_{qs2}, v_{dr}, v_{qr}]^t$ est le vecteur de commande

$[I] = [I_{ds1}, I_{qs1}, I_{ds2}, I_{qs2}, I_{dr}, I_{qr}]^t$ est le vecteur d'état, et $[i] = \frac{d}{dt} [I]$.

$[B] = \text{diag} [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$.

$$[L] = \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_{s1} + L_m) & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m & 0 & (L_{s1} + L_m) \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -L_m & 0 & -(L_r + L_m) \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) & 0 \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} R_{s1} & -\omega_s(L_{s1} + L_m) & 0 & -\omega_s L_m & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s(L_{s1} + L_m) & R_{s1} & \omega_s L_m & 0 & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & -\omega_s L_m & R_{s2} & -\omega_s(L_{s2} + L_m) & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_m & 0 & \omega_s(L_{s2} + L_m) & R_{s2} & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

En mettant le système (II.33) sous forme d'état, on trouve :

$$[I] = [L]^{-1}([B] [U] - \omega_{gl}[C] [I] - [D] [I]) \quad (\text{II.21})$$

II.4.6 Puissance absorbée et couple électromagnétique

La puissance absorbée par la MASDE dans le système d'axes (d, q), tout en négligeant les composantes homopolaires est exprimée par :

$$P_a = v_{ds1} I_{ds1} + v_{qs1} I_{qs1} + v_{ds2} I_{ds2} + v_{qs2} I_{qs2} \quad (\text{II.22})$$

En remplaçant les tensions ($v_{ds1}, v_{qs1}, v_{ds2}$ et v_{qs2}) par leurs expressions dans l'équation (II.22), on trouve :

$$P_a = [R_{s1} I_{ds1}^2 + R_{s1} I_{qs1}^2 + R_{s2} I_{ds2}^2 + R_{s2} I_{qs2}^2] + \left(\frac{d\phi_{ds1}}{dt} I_{ds1} + \frac{d\phi_{qs1}}{dt} I_{qs1} + \frac{d\phi_{ds2}}{dt} I_{ds2} + \frac{d\phi_{qs2}}{dt} I_{qs2} \right) + \omega_s (\phi_{ds1} I_{ds1} - \phi_{qs1} I_{qs1} + \phi_{ds2} I_{ds2} - \phi_{qs2} I_{qs2}) \quad (\text{II.23})$$

Cette expression se compose de trois termes : le premier correspond aux pertes par effet Joule, le second représente la variation de l'énergie électromagnétique (réserve d'énergie) et le dernier est la puissance électromagnétique (P_{em}).

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = p \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (\text{II.24})$$

L'expression du couple électromagnétique est exprimée alors par :

$$C_{em} = p(\varphi_{ds1}I_{ds1} - \varphi_{qs1}I_{qs1} + \varphi_{ds2}I_{ds2} - \varphi_{qs2}I_{qs2}) \quad (\text{II.25})$$

En remplaçant les flux ($\varphi_{ds1}, \varphi_{qs1}, \varphi_{ds2}, \varphi_{qs2}$) donnés par (II.19) dans (II.25), on obtient l'équation(II.26):

$$C_{em} = \rho L_m [(I_{qs1} + I_{qs2})I_{dr} - (I_{ds1} + I_{ds2})I_{qr}] \quad (\text{II.26})$$

A partir des équations des flux rotorique (φ_{dr} et φ_{qr}) exprimées par (II.19), on tire les expressions :

$$I_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{dr} - L_m(I_{ds1} + I_{ds2})] \quad (\text{II.27})$$

$$I_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{qr} - L_m(I_{qs1} + I_{qs2})] \quad (\text{II.28})$$

En remplaçant (II.27) et (II.28) dans l'équation (II.26), l'expression du couple électromagnétique en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) est donnée par l'équation :

$$C_{em} = \rho \frac{L_m}{L_m + L_r} [(I_{qs1} + I_{qs2})\varphi_{dr} - (I_{ds1} + I_{ds2})\varphi_{qr}] \quad (\text{II.29})$$

Les puissances active et réactive au stator sont définies par :

$$P_S = v_{ds1}I_{ds1} + v_{ds2}I_{ds2} + v_{qs1}I_{qs1} + v_{qs2}I_{qs2} \quad (\text{II.30})$$

$$Q_S = v_{qs1}I_{ds1} + v_{qs2}I_{ds2} - v_{ds1}I_{qs1} - v_{ds2}I_{qs2} \quad (\text{II.31})$$

II.5 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande MLI

II.5.1 Modélisation de l'onduleur de tension

Un onduleur autonome (à commande adjacente ou à M.L.I) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable. Le contrôle de la vitesse et du couple de la MASDE se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable. Chaque étoile de la MASDE est connectée à un onduleur triphasé.

Ce dernier est constitué de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé } (K_i \text{ conduit}, \bar{K}_i \text{ bloqué}) \\ 0 & \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert } (K_i \text{ bloqué}, \bar{K}_i \text{ conduit}) \end{cases}$$

Avec

$$\begin{aligned} f_i + \bar{f}_i &= 1 \\ i &= 1 \dots 3 \end{aligned}$$

La figure (II.6) représente le schéma de l'onduleur triphasé.

Les tensions composées sont :

$$\begin{cases} V_{AB} = v_{as1} - v_{bs1} = E(f_1 - f_2) \\ V_{BC} = v_{bs1} - v_{cs1} = E(f_2 - f_3) \\ V_{CA} = v_{cs1} - v_{as1} = E(f_3 - f_1) \end{cases} \quad (II.32)$$

Les tensions simples $v_{as1}, v_{bs1}, v_{cs1}$ forment un système triphasé tel que :

$$v_{as1} + v_{bs1} + v_{cs1} = 0 \quad (II.33)$$

La résolution des équations (II.32) et (II.33) donne :

$$\begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (II.34)$$

Pour le second onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

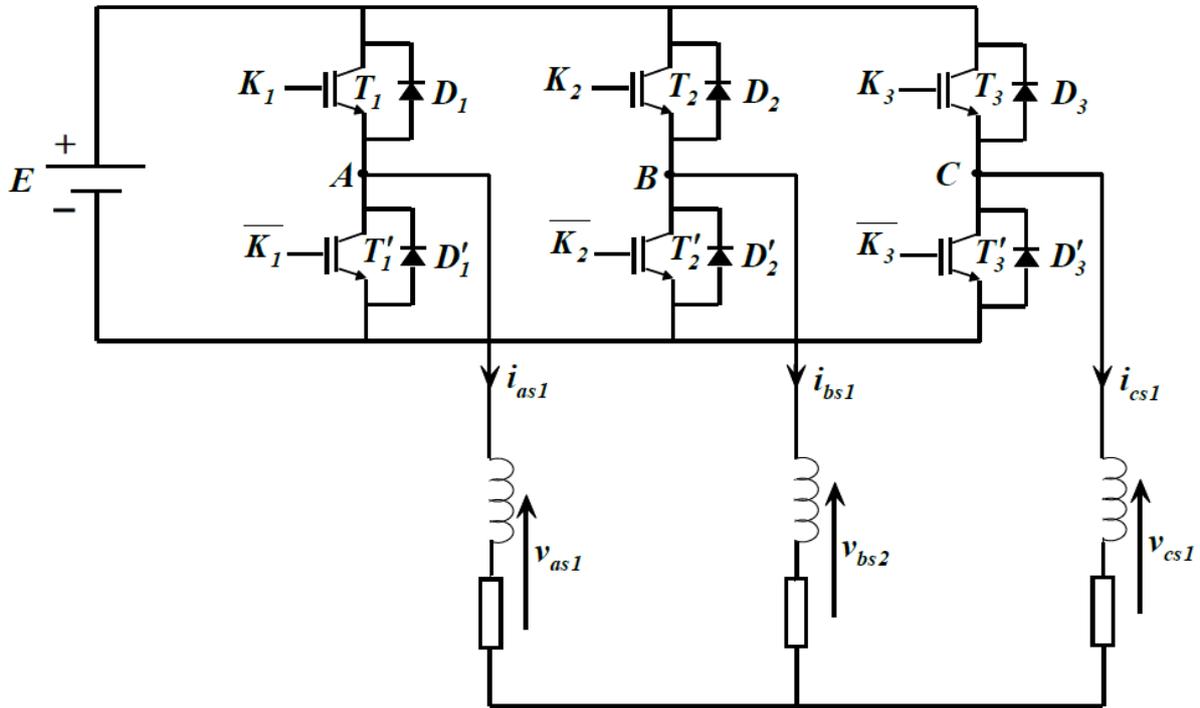


Figure II 7 Schéma de l'onduleur triphasé

II.5.2 Stratégie de commande sinus-triangle

La commande MLI sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme en dents de scie. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

Pour la première étoile :

$$\begin{cases} v_{a1}^* = v_m \sin(2\pi ft) \\ v_{b1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Chapitre II Modélisation des différentes parties du système étudié

Pour la seconde étoile, il suffit de remplacer dans le système d'équation (II.49), $(2\pi ft)$ par $(2\pi ft - \alpha)$ et l'indice 1 par 2.

$$\begin{cases} v_{a2}^* = v_m \sin(2\pi ft - \alpha) \\ v_{b2}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c2}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$v_p(t) = \begin{cases} v_{pm} \left[4 \left(\frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ v_{pm} \left[-4 \left(\frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f) :

$$\text{Avec : } m = \frac{f_p}{f}$$

Le coefficient de réglage en tension r égal au rapport de l'amplitude maximale de la tension de référence (v_m) et la valeur crête de l'onde de modulation (v_{pm}).

$$\text{Avec : } r = \frac{v_m}{v}$$

II.5.3 Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

La figure II.7 représente l'association de la MASDE-convertisseurs de tensions à commande MLI sinus-triangle.

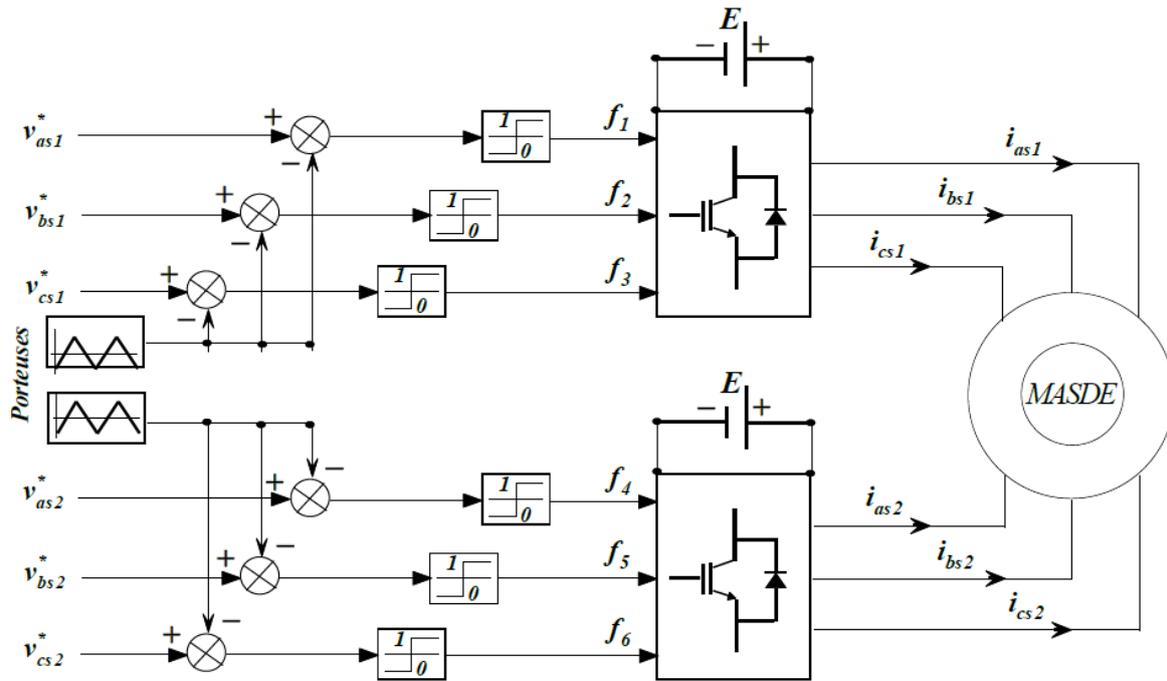


Figure II 8 MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

II.6 Modélisation de bus continu

Le bus continu est un élément de stockage d'énergie, représenté par une capacité qui sert de source tampon d'énergie entre les deux convertisseurs cote machine, il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit (figure II-8).

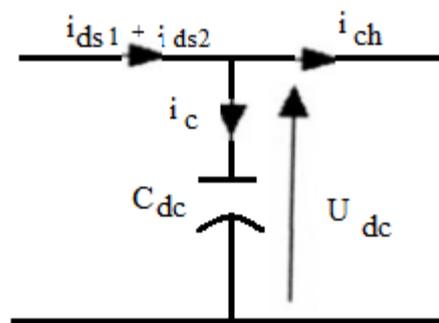


Figure II 9 Représentation du bus continu

Chaque convertisseur exerce son influence sur ce circuit, par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur. L'évolution temporelle de la tension à ses bornes est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif.

$$U_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \cdot \int_0^t i_c dt$$

$$i_c = i_{dc1} + i_{dc2} - i_{ch}$$

$$U_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \cdot \int_0^t (i_{dc1} + i_{dc2} - i_{ch}) dt \tag{II.39}$$

Pour pouvoir contrôler efficacement les courants cote alternatif, le niveau de tension sur le bus continu doit vaincre la valeur crête de la tension compose de la charge.

A partir de la valeur de la tension désirée, on détermine l'expression de la puissance de référence (en négligeant les pertes) :

$$P_{ele} = U_{dc} \cdot i_c = c_{em} \Omega_{mec}$$

II.7 Simulation et interprétation des résultats

La structure en schéma bloc de cette simulation est présentée par la figure (II.9)

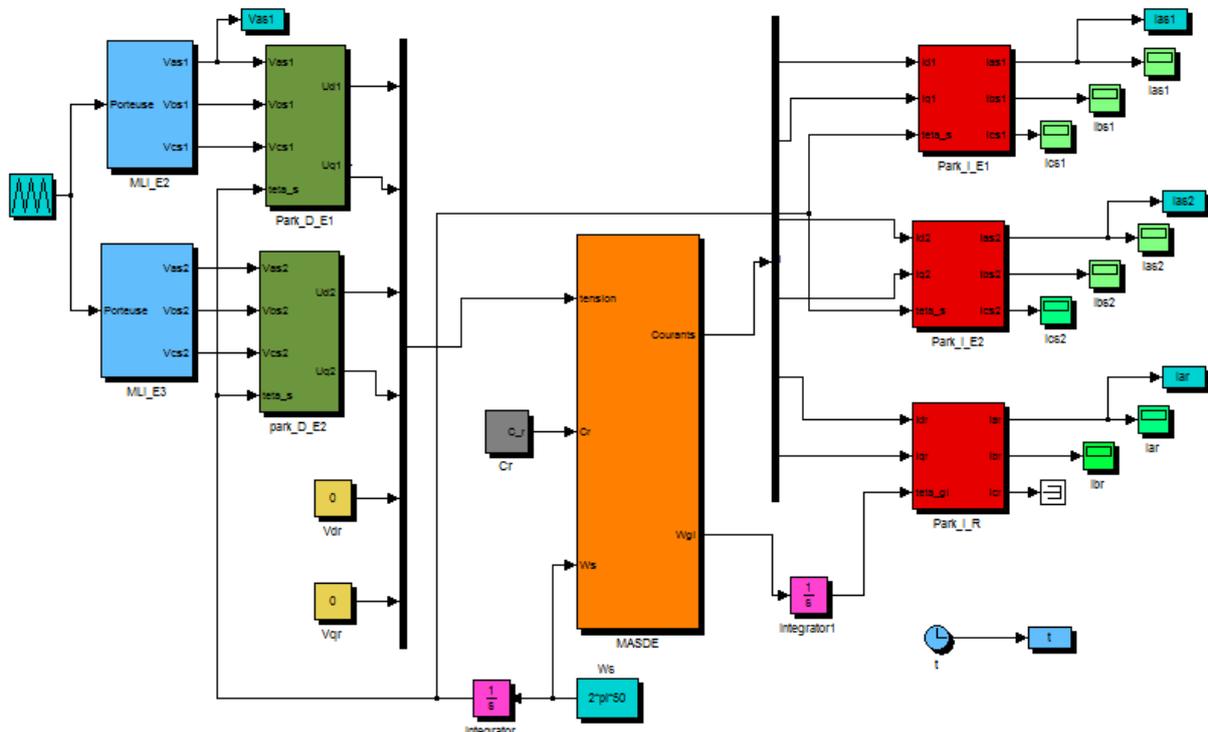


Figure II 10 Schéma bloc global de simulation de la MASDE alimentée par deux onduleurs M.L.I.

Les figures III.10 (a-b-c-d-e-f-g), montrent respectivement : couple électromagnétique, la vitesse de rotation, les flux φ_{dr} et φ_{qr} , les courants (I_{ds1}, I_{ds2}) et (I_{qs1}, I_{qs2}) ainsi que (V_{as1}, I_{as1}) .

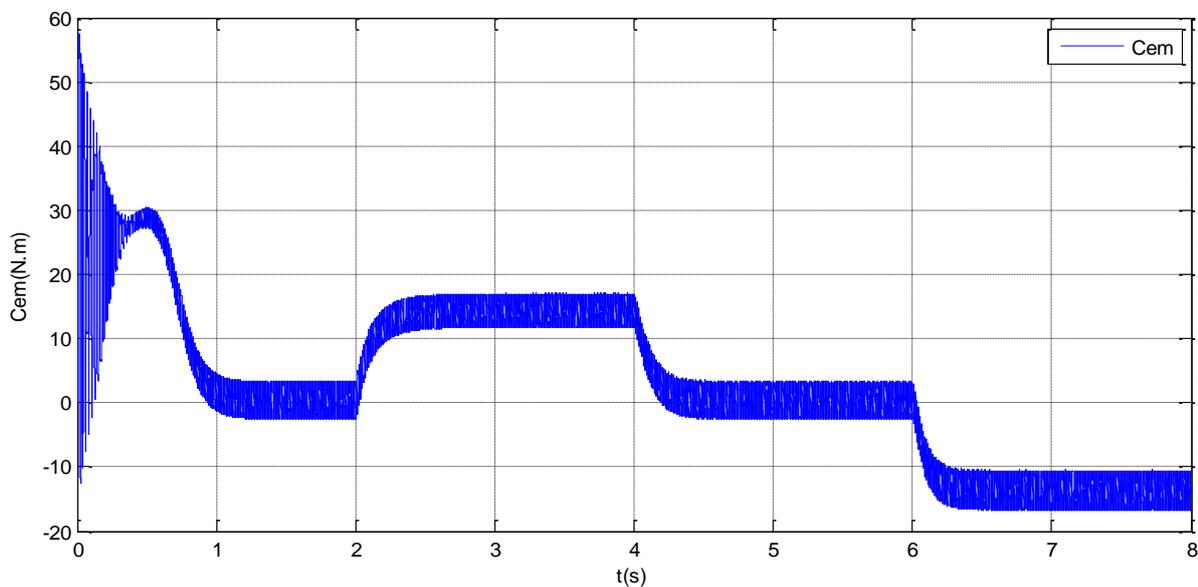
Pour la simulation il suffit d'implanter le modèle électrique de la machine asynchrone double étoiles sous l'environnement Matlab/Simulink. La MASDE est alimentée par des

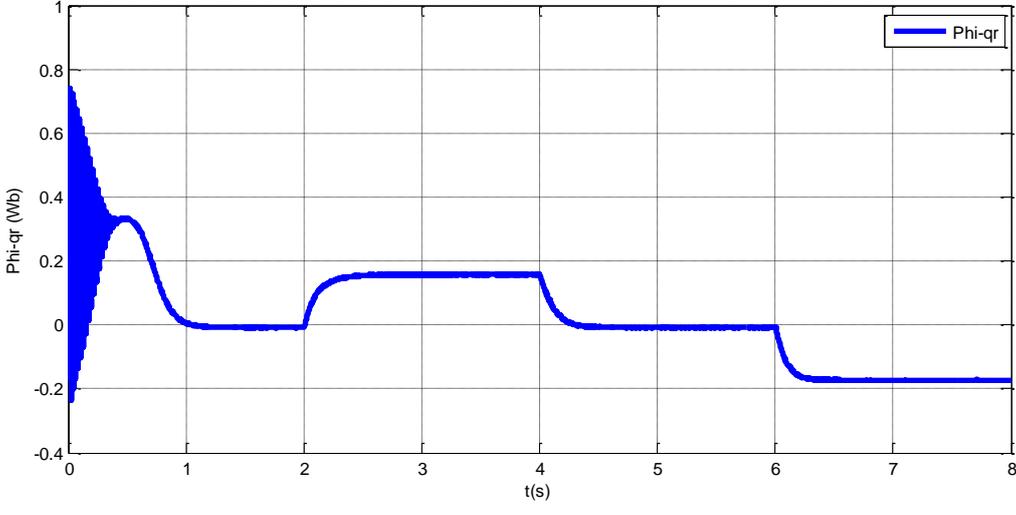
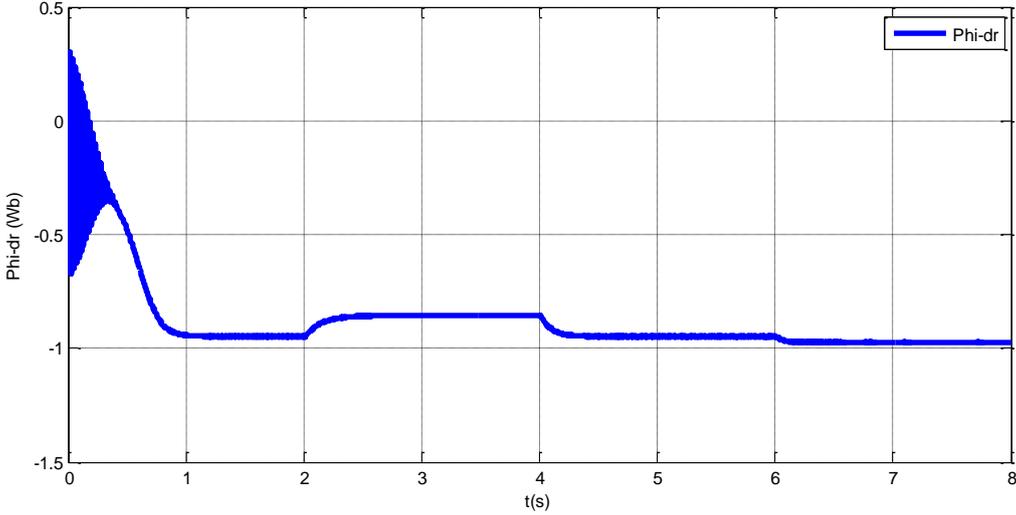
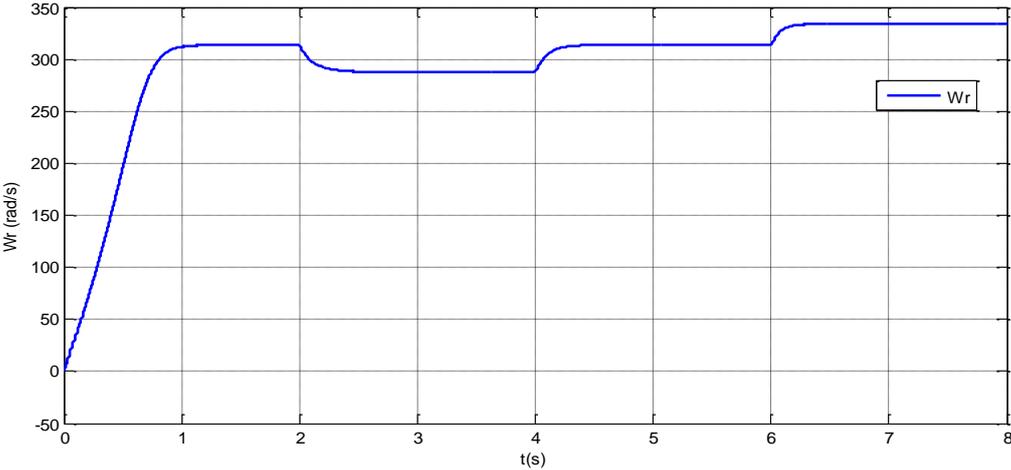
sources purement sinusoïdales, équilibrées. Dont on a appliqué des charge $Cr1= 14$ et $Cr2= -14$ N.m, respectivement entre les intervalles de temps $t= [2,4]$ et $[6,8]$.

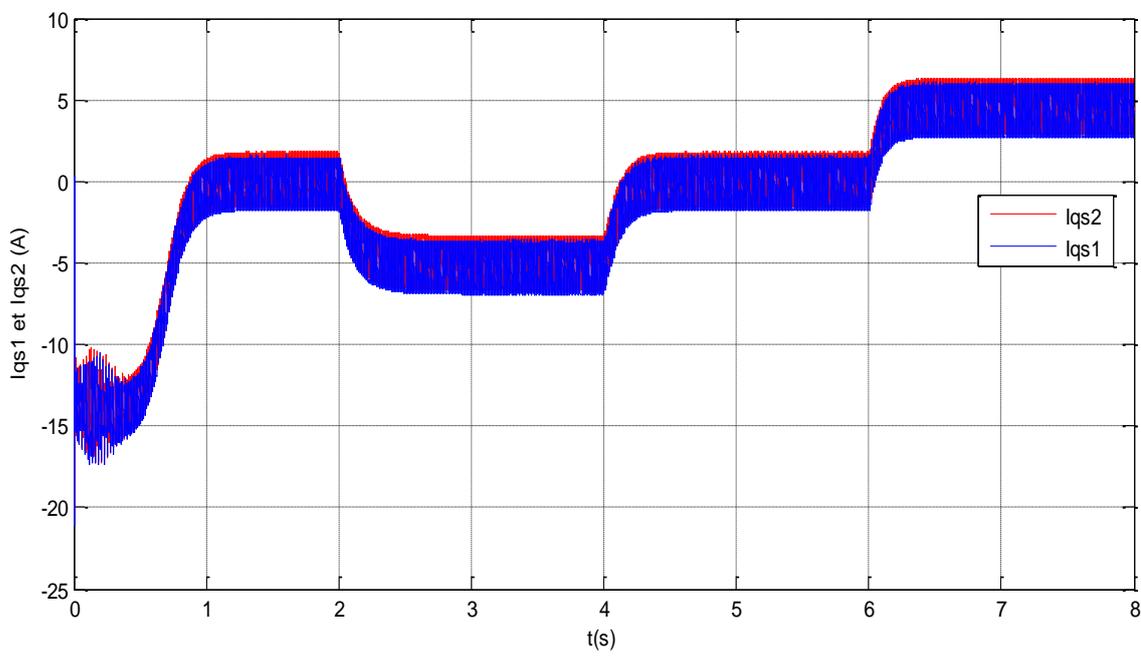
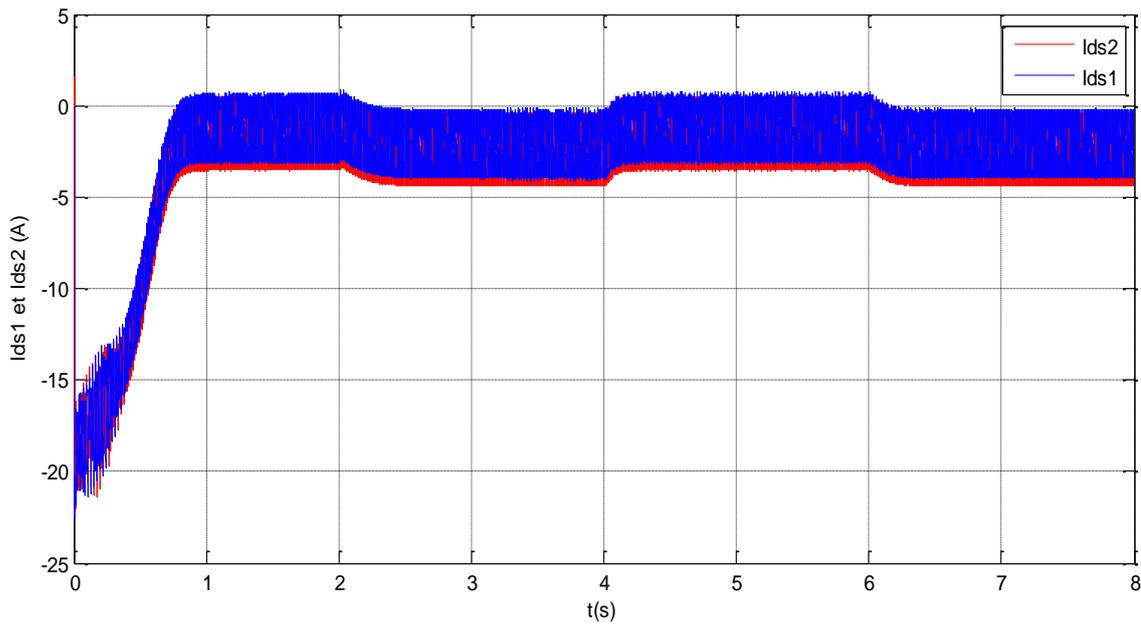
Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse augmente et évolué d'une manière presque linéaire jusqu'à atteint une valeur proche du synchronisme. Au bout de $t=1s$, le couple électromagnétique atteint sa valeur maximale et présente des oscillations qui disparaissant au bout de 0.5 s, puis il diminue d'une façon presque linéaire et se stable à une valeur qui correspondant au frottement de la machine.

A partir de l'instant $t=2s$, en appliquant la charge $Cr1=14$ N.m couple positive alors la machine est en fonctionnement moteur. Le couple électromagnétique suit parfaitement le couple résistant, la vitesse diminue légèrement et prend la valeur nominale, le courant est en retard par rapport à la tension, qui signifie que la MASDE absorbe de la puissance active et réactive de la source.

A l'application d'un couple négatif (fonctionnement génératrice) au-delà l'instant $t=6s$, le couple électromagnétique suit le couple résistant négatif, on constate que la vitesse et les courants statoriques selon l'axe en quadratures augmentent puis ils stabilisent respectivement, par contre des diminutions sont observées par le couple électromagnétique, les courants statoriques selon l'axe direct et par les flux suivant les deux axes (d, q) puis ils stabilisent respectivement. Le produit du courant et de la tension est négative ce qui signifie que la MASDE fournie de la puissance active et absorbe une puissance réactive pour sa magnétisation







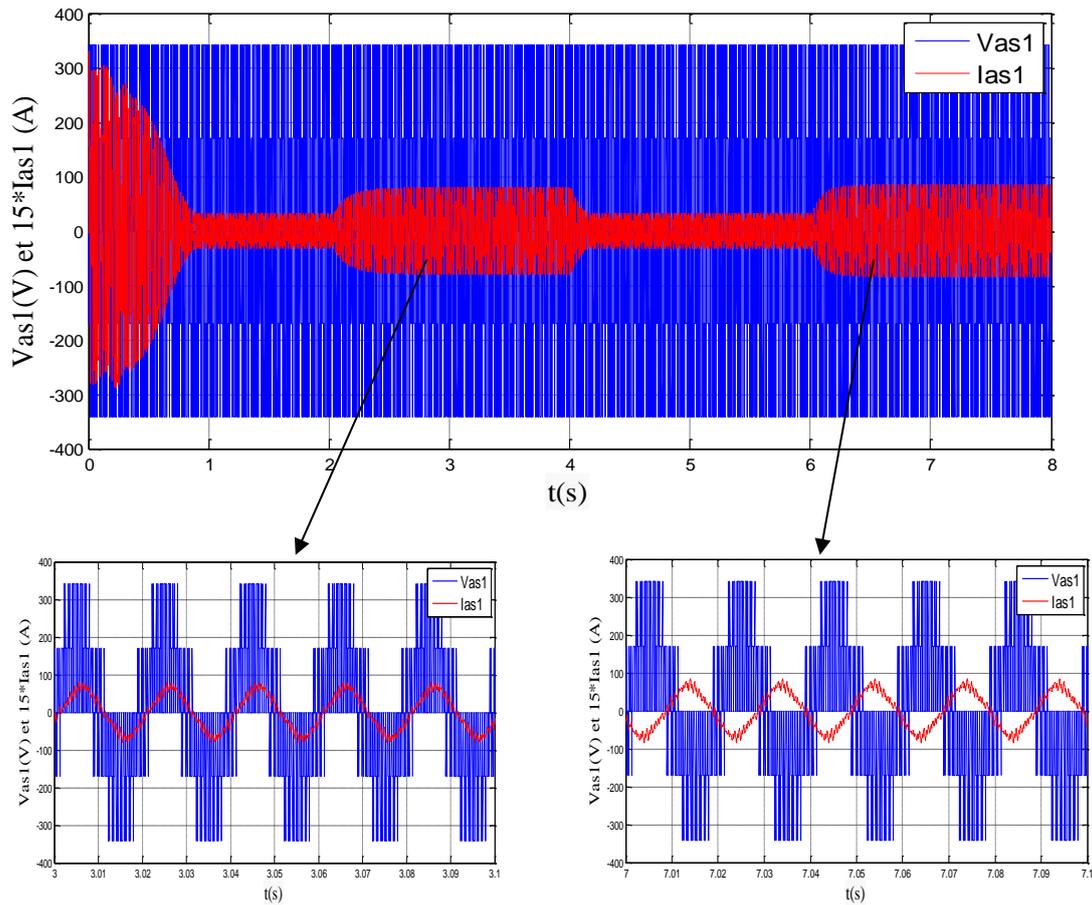


Figure II 11 Evolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux Onduleurs de tension, suivi de l'application des charges $C_r=14$ et $C_r=-14$ respectivement entre les intervalles de temps $t \in [2, 4]$ et $t \in [6, 8]$.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une description des éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne en commençant par la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne, ensuite nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone double étoile puis celle des convertisseurs associés ainsi que la modélisation de bus continu. Enfin on a terminé par donner les résultats de simulations de l'alimentation de la MASDE par deux convertisseurs de tension alimentés par le réseau électrique ainsi que leurs interprétations.

Le chapitre suivant sera consacré au contrôle d'un système éolien en fonctionnement autonome.

Chapitre III

*Contrôle d'un système
éolien
en fonctionnement
autonome*

III.1 Introduction

La difficulté pour commander une machine asynchrone réside dans le fait qu'il existe un couplage complexe entre les variables d'entrée, les variables de sortie et les variables internes de la machine comme le flux, le couple et la vitesse ou la position.

Blaschke a proposé en 1972 une méthode, dite « commande vectorielle », permettant d'obtenir une situation pour la machine asynchrone équivalente à celle de la machine à courant continu à excitation séparée. Le vecteur courant statorique est décomposé en deux composantes, l'une contrôle le flux et l'autre contrôle le couple. [26]

Ce chapitre sera consacré à l'étude du principe de la commande vectorielle d'une machine asynchrone double étoile par orientation du flux, on supposera par la suite les différentes méthodes de la commande à savoir les méthodes directe et indirecte. Ensuite, les performances de la commande seront quantifiées pour des variations de charge puis de vitesses. Enfin, on termine par donner les résultats de simulations et leurs interprétations.

III.2 Principe de la commande vectorielle [26]

Le but de cette commande est d'assimiler le comportement de la GASDE à celui d'une machine à courant continu à excitation séparé.

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une des deux composantes du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axes (d, q) et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux.

Pour simplifier la commande, il est nécessaire de faire un choix de référentiel. On se place donc dans un référentiel (d, q) lié au champ tournant tel que l'axe « d » coïncide avec la direction désirée du flux.

La commande d'une machine à courant continu est effectuée simplement en pilotant deux courants continus. Par contre, le cas d'une machine asynchrone à double étoile est beaucoup plus difficile car il faut piloter cinq grandeurs, quatre courants (direct et en quadrature) ou quatre tensions statoriques (direct et en quadrature) et la fréquence de ces signaux. L'orientation de l'un des trois champs statorique, rotorique ou d'entrefer de la machine suivant l'axe « d » du référentiel constitue le principe de base de la commande par orientation du flux (commande vectorielle). Cette orientation permet de transformer l'expression du couple électromagnétique à une forme similaire à celle de la machine à courant continu.

L'expression du couple électromagnétique de la MCC est donnée par :

$$C_{em} = K\varphi I_a = K' I_a \cdot I_f \tag{III.1}$$

Avec :

φ : Flux imposé par le courant d'excitation I_f ;

I_a : Courant d'induit ;

K, K' : Constantes.

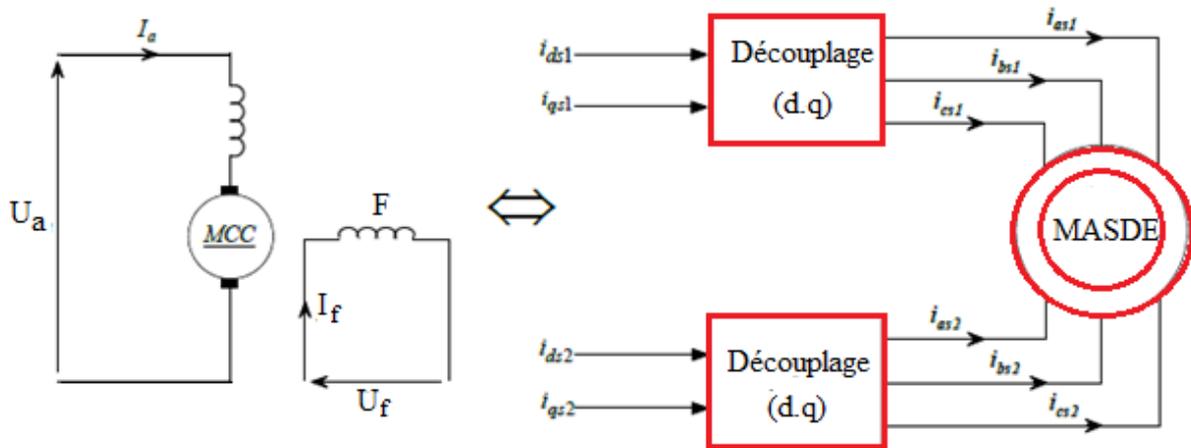


Figure III 1 Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE

III.3 Théorie du flux orienté

La méthode de flux orienté est basée sur le choix du repère de référence, suivant la vitesse attribuée au repère (d, q), de ce fait, les choix concernant l'alimentation et le repère ont été accomplis, dont l'alimentation en tension et le repère lié au champ tournant. Alors l'étape suivante du raisonnement consiste à fixer l'orientation du flux.

Pour cela, trois choix sont possibles :

- Orientation du flux rotorique avec les conditions $\phi_{dr} = \phi_r \phi_{qr} = 0$.
- Orientation du flux statorique avec les conditions $\phi_{ds} = \phi_s \phi_{qs} = 0$.
- Orientation du flux d'entrefer avec les conditions $\phi_{dm} = \phi_m \phi_{qm} = 0$.

Beaucoup de chercheurs utilisent l'orientation du flux rotorique pour la commande de la machine à induction. Dans notre étude, nous avons opté pour la technique d'orientation du flux rotorique. Pour la machine asynchrone à double étoile, la commande vectorielle consiste à réaliser un découplage des grandeurs génératrices, permet d'obtenir un variateur de vitesse où le couple électromagnétique et flux rotorique sont indépendamment commandés à travers les courants statoriques direct et quadratique, respectivement. Dans l'expression du couple

électromagnétique (II.29) on coïncidant le flux rotorique avec l'axe « d » du référentiel lié au champ tournant, tel que

$$\varphi_{dr} = \varphi_r^*, \quad \varphi_{qr} = 0. \quad (\text{III.2})$$

Sera donner par :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{qs1} + i_{qs2})\varphi_r] = K^* \varphi_r i_r \quad (\text{III.3})$$

D'après l'équation (III.3) nous constatons que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant. Cette expression rappelle le couple de la machine à courant continu à excitation séparée. On déduit donc que le fonctionnement de la machine asynchrone à double étoile, avec sa commande vectorielle est similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée.

III.4 Différentes méthodes de la commande vectorielle [25]

La commande vectorielle de la MASDE peut être soit directe ou indirecte.

III.4.1 Méthode de commande directe

Cette méthode consiste à déterminer la position et le module du flux quel que soit le Régime de fonctionnement, pour cela deux procédés sont utilisés :

- La mesure du flux dans l'entrefer de la machine en plaçant une spire sous un pôle de chaque phase. L'inconvénient principal de cette technique, réside dans le fait que la fragilité et les problèmes de fiabilité limitent sa mise en œuvre ;
- l'estimation du flux à l'aide des méthodes mathématiques. Cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine.

III.4.2 Méthode de commande indirecte

La méthode indirecte consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux, mais seulement sa position, dans ce cas le flux est contrôlé en boucle ouverte.

III.5 Commande vectorielle indirecte

Les lois de commande sont obtenues à partir des équations de la MASDE liées au champ tournant et par orientation du flux rotorique. On considère comme grandeurs de références le flux rotorique φ_r^* et le couple C_{em}^* . La (figure III-2) représente le schéma de principe de la commande à flux orienté.

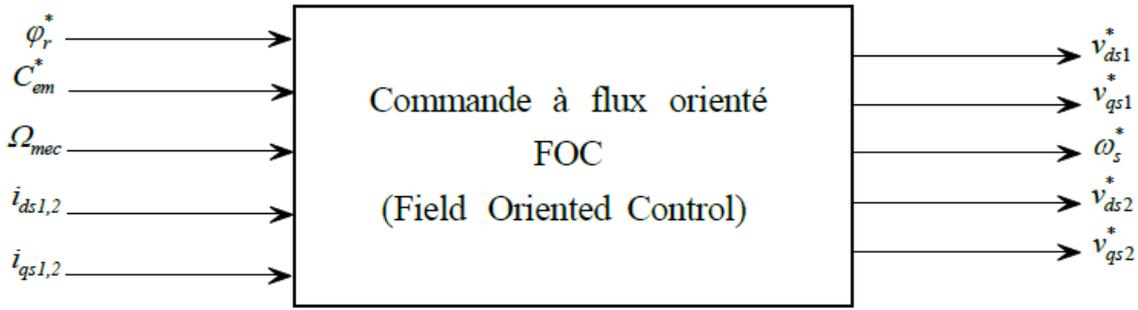


Figure III 2 Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC)

En remplaçant l'équation (III.2) dans les équations des tensions rotoriques, on obtient :

$$R_r \cdot I_{dr} = 0 \Rightarrow I_{dr} = 0 \quad (III.4)$$

Et

$$R_r \cdot I_{qr} + \omega_{gl}^* \cdot \varphi_r^* = 0 \Rightarrow I_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \cdot \varphi_r^*}{R_r} \quad (III.5)$$

A partir des équations (II.27) et (II.28), on trouve :

$$I_{dr} = \frac{\varphi_r^*}{L_m + L_r} - \frac{L_m}{L_m + L_r} (I_{ds1} + I_{ds2}) \quad (III.6)$$

$$I_{qr} = -\frac{L_m}{L_m + L_r} (I_{qs1} + I_{qs2}) \quad (III.7)$$

En introduisant (III.6) et (III.7) dans le système d'équations des flux statoriques, on aura:

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \lambda_1 \cdot I_{ds1} + L_r B I_{ds2} + B \cdot \varphi_r^* \\ \varphi_{qs1} = \lambda_1 \cdot I_{qs1} + L_r B I_{qs2} \\ \varphi_{ds2} = \lambda_2 \cdot I_{ds2} + L_r B I_{ds1} + B \cdot \varphi_r^* \\ \varphi_{qs2} = \lambda_2 \cdot I_{qs2} + L_r B I_{qs1} \end{cases} \quad (III.8)$$

Avec

$$B = \frac{L_m}{L_m + L_r}$$

$$\lambda_1 = L_{s1} + B L_r \quad \text{et} \quad \lambda_2 = L_{s2} + B L_r$$

En introduisant (III.4) dans (III.6), on tire :

Chapitre III *Contrôle d'un système éolien en fonctionnement autonome*

$$\varphi_r^* = L_m(I_{ds1} + I_{ds2}) \quad (III.9)$$

A partir de l'équation (III.7), on trouve :

$$L_m(I_{qs1} + I_{qs2}) = -(L_m + L_r)I_{qr} \quad (III.10)$$

En remplaçant (III.8) et (III.10) dans le système d'équations des tensions statoriques, on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds1}^* = R_{s1} \cdot I_{ds1} + L_{s1} s I_{ds1} - \omega_s^* (L_{s1} \cdot I_{qs1} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs1}^* = R_{s1} \cdot I_{qs1} + L_{s1} s I_{ds1} - \omega_s^* (L_{s1} \cdot I_{ds1} + \varphi_r^*) \\ v_{ds2}^* = R_{s2} \cdot I_{ds2} + L_{s2} s I_{ds2} - \omega_s^* (L_{s2} \cdot I_{qs2} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs2}^* = R_{s2} \cdot I_{qs2} + L_{s2} s I_{ds2} - \omega_s^* (L_{s2} \cdot I_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (III.11)$$

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} \quad \text{et} \quad \omega_{gl}^* = \omega_s^* - \omega_r$$

En introduisant l'équation (III.7) dans (III.5), on tire :

$$\omega_{gl}^* = \frac{R_r L_m (I_{qs1} + I_{qs2})}{(L_m + L_r) \varphi_r^*} \quad (III.12)$$

A partir de la relation (III.2), on trouve :

$$I_{ds1}^* + I_{ds2}^* = \frac{(L_m + L_r) C_{em}^*}{p L_m \varphi_r^*} \quad (III.13)$$

Le système d'équations électriques (III.11) montre que les tensions ($v_{ds1}^*, v_{qs1}^*, v_{ds2}^*, v_{qs2}^*$) influent au même temps sur les composantes des courants statoriques directes et en quadratures ($i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}$), donc sur le flux et sur le couple. Il est alors nécessaire de réaliser un découplage en définissant de nouvelles variables ($v_{ds1r}, v_{qs1r}, v_{ds2r}, v_{qs2r}$) n'agissant respectivement que sur ($i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}$), tel que :

$$\begin{cases} v_{ds1r} = R_{s1} \cdot I_{ds1} + L_{s1} \cdot s I_{ds1} \\ v_{qs1r} = R_{s1} \cdot I_{qs1} + L_{s1} \cdot s I_{qs1} \\ v_{ds2r} = R_{s2} \cdot I_{ds2} + L_{s2} \cdot s I_{ds2} \\ v_{qs2r} = R_{s2} \cdot I_{qs2} + L_{s2} \cdot s I_{qs2} \end{cases} \quad (III.14)$$

Afin de compenser l'erreur introduite lors de découplage, les tensions statoriques de références à flux constant sont exprimées par :

$$\begin{cases} v_{ds1}^* = v_{ds1r} - v_{ds1c} \\ v_{qs1}^* = v_{qs1r} + v_{qs1c} \\ v_{ds2}^* = v_{ds2r} - v_{ds2c} \\ v_{qs2}^* = v_{qs2r} + v_{qs2c} \end{cases} \quad (III.15)$$

Où :

$$\begin{cases} v_{ds1c} = \omega_s^* (L_{s1} \cdot I_{qs1} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs1c} = \omega_s^* (L_{s1} \cdot I_{ds1} + \varphi_r^*) \\ v_{ds2c} = \omega_s^* (L_{s2} \cdot I_{qs2} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs2c} = \omega_s^* (L_{s2} \cdot I_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (III.16)$$

III.5.1 Application de la commande indirecte sur la MASDE

L'application de la commande vectorielle indirecte sans le réglage de vitesse sur la GASDE est illustrée par la figure (III.3).

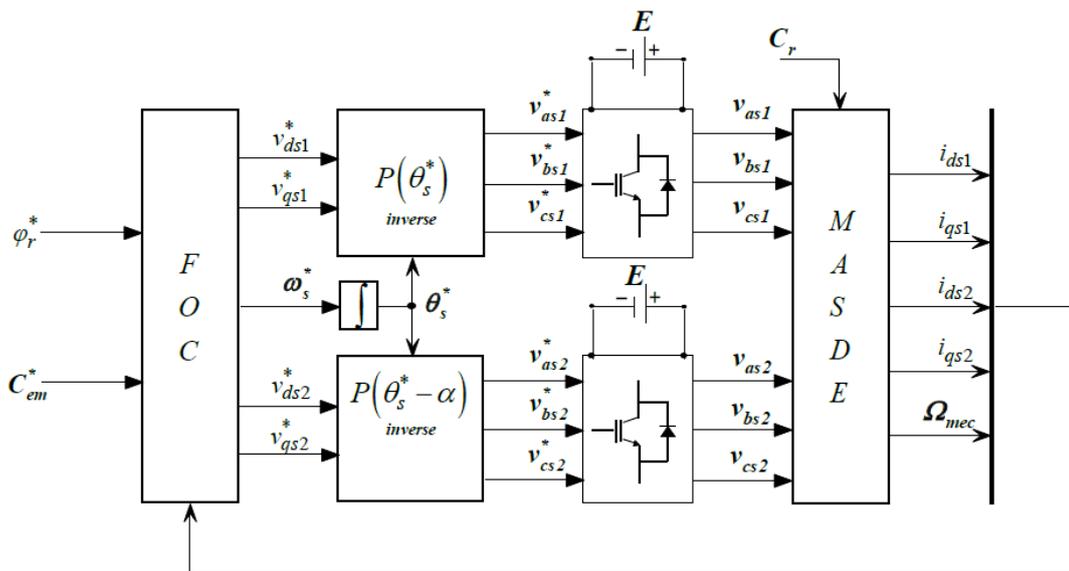


Figure III 3 Représentation schématique de la commande FOC sur la MASDE [23]

III.5.2 Principe du defluxage

Le principe du defluxage, consiste à déterminer directement la composante du flux rotorique à partir de la vitesse mécanique de rotation du rotor en utilisant un capteur de vitesse, cela est réalisable par un bloc de defluxage définit par la fonction non linéaire suivante :

$$\begin{cases} \varphi_r^* = \varphi_n \text{ si } |\Omega| \leq \Omega_n \\ \varphi_r^* = \frac{\varphi_n \Omega_n}{|\Omega|} \text{ si } |\Omega| > \Omega_n \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Schématisé selon la figure suivante :

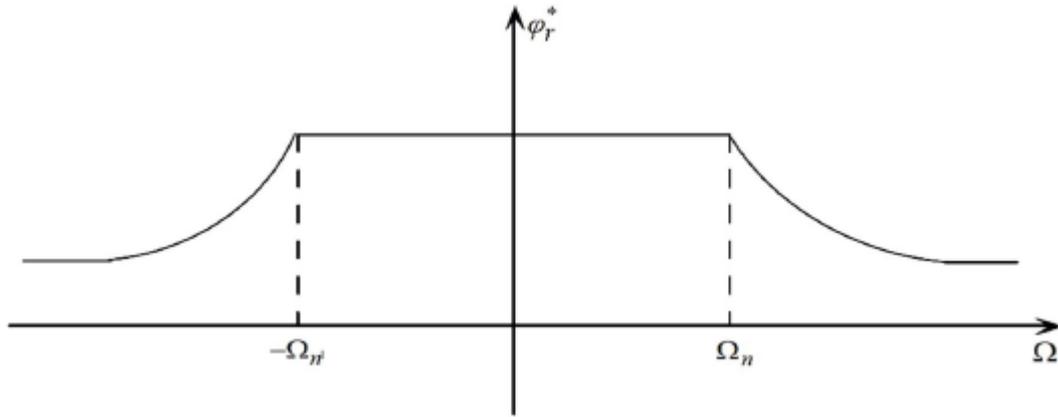


Figure III 4 Schéma de défluxage

Le flux est généralement maintenu constant à sa valeur nominale, pour des vitesses rotorique inférieures ou égales à la vitesse nominale de la machine Ω_n , pour des vitesses supérieures, le flux décroît lorsque la vitesse augmente afin de limiter la tension aux bornes de la machine.

III.6 Application de la commande vectorielle pour la GASDE en fonctionnement autonome

Le schéma global du système est représenté sur la figure (III.7)

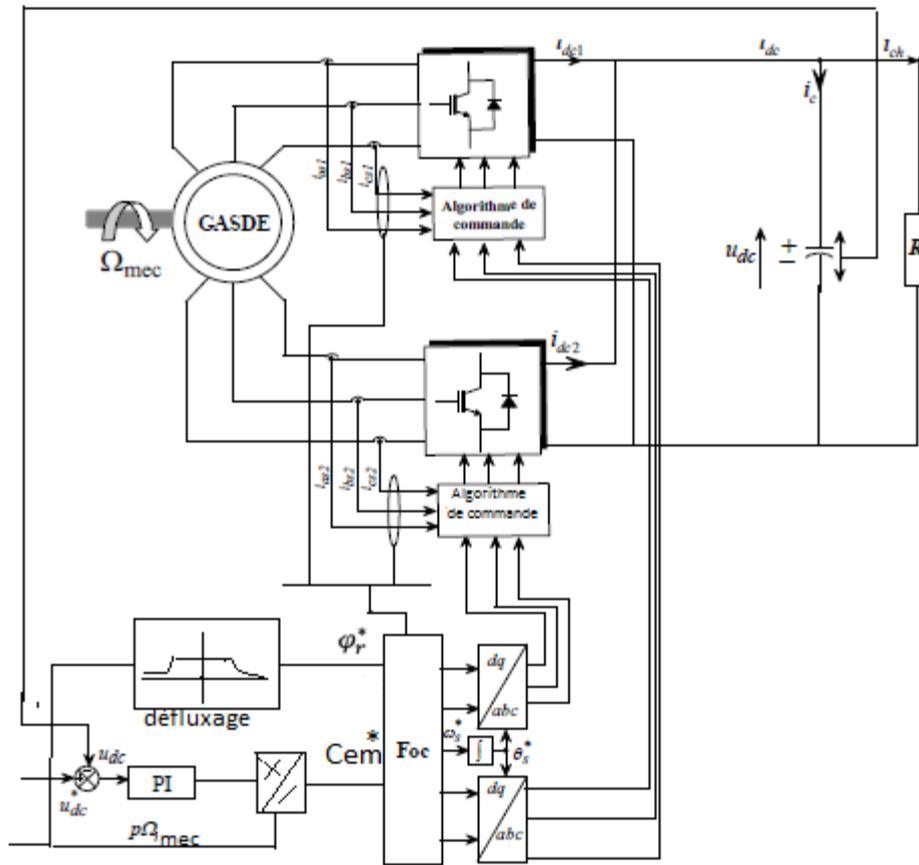


Figure III 5 Schéma global du système étudié

III.7 Simulation et interprétation des résultats

Le système global à étudier est constitué d'une GASDE connectée à deux redresseur/onduleur et commandée suivant la stratégie de commande présentée précédemment. Dans ce qui suit, deux tests de simulation sont effectués afin d'analyser les performances de la commande : le premier test est consacré au comportement de la commande à vitesse fixe et charge variable purement résistive ; le deuxième est destiné à l'étude de la commande à présence d'une charge fixe et vitesse variable.

Les résultats de simulation du système étudiée basé sur la génératrice asynchrone double étoile (dont les paramètres sont données en Annexe), obtenus sous l'environnement MATLAB/Simulink sont représentés et commentés.

III.7.1 Influence de la variation de la charge

La vitesse d'entraînement est fixée à 314rad/s avec une valeur de la tension redressée de référence $U_{dc}^* = 622V$ pendant toute la durée de simulation

L'amorçage de la génératrice ayant eu lieu à vide, Pendant l'intervalle de temps de [0 2]s (le fonctionnement à vide) on a opté à charger initialement une capacité de valeur de 100 μF , afin de fournir de l'énergie réactive nécessaire pour l'amorçage.

A l'instant $t = 2s$, on insère une charge résistive de 75% de sa valeur nominale, et à l'instant $t = 4s$ on insère une autre résistance de 100% de sa charge nominale. On constate une bonne réponse de la commande.

Les résultats de simulation montrent que La tension de bus continu suit sa référence comme montré dans la figure (III.6).

La figure (III.7) illustre l'allure de la puissance active qui atteint presque sa valeur nominale ce qui est l'avantage principal de la structure étudiée, elle répond aux différentes charges appliquées tout en suivant sa référence.

La tension est insensible à la variation de la charge, contrairement au courant et au couple électromagnétique qui sont influencés à cette variation comme illustre dans les figures (III.8) et (III.10).

Les figures (III.9) représentent les courants statoriques des deux étoiles, on remarque que la 2ème étoile est décalée d'un $\alpha=30^\circ$ par rapport à la 1ère étoile.

Le flux rotorique direct prend sa valeur de consigne et le flux en quadrature s'annule. Comme elle est montré dans les figures (III.13) et (III.14) respectivement.

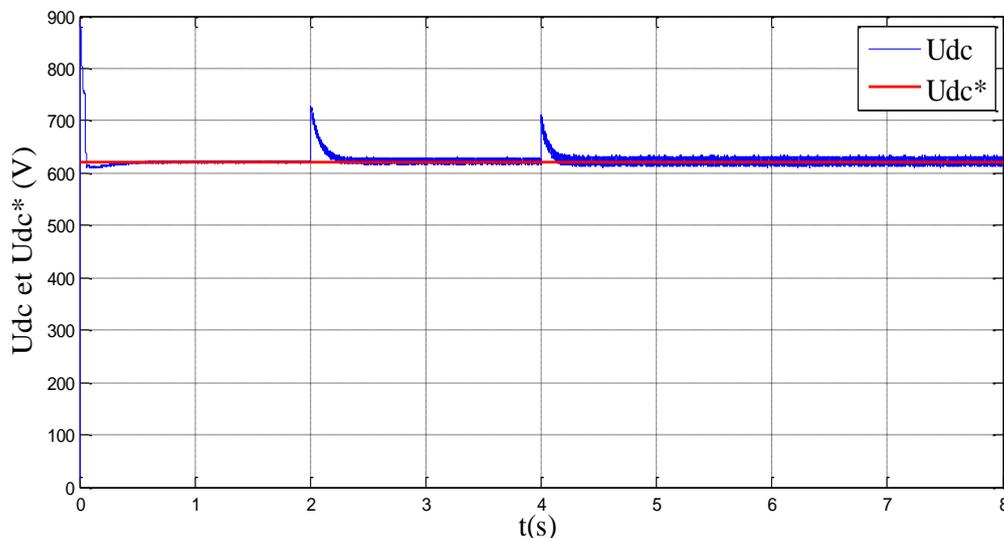


Figure III 6 Allure de la tension du bus continu

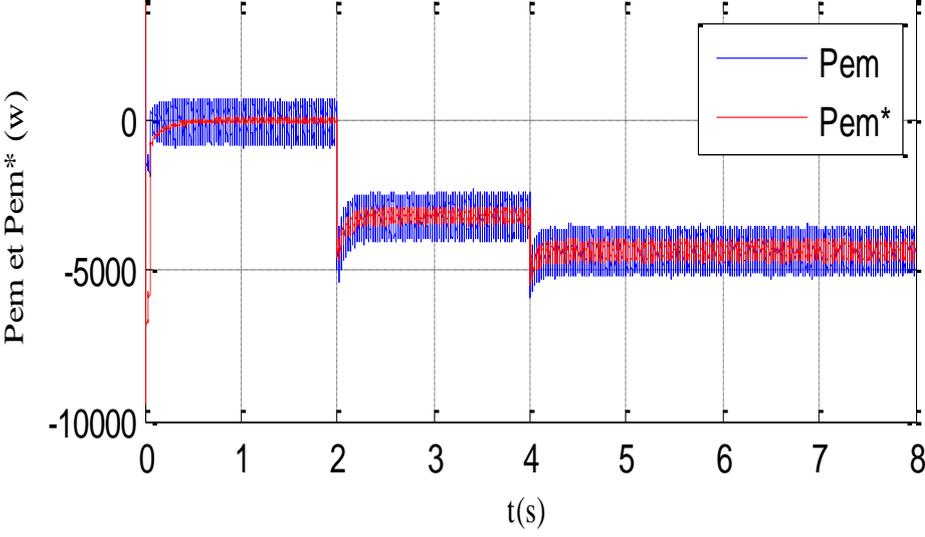


Figure III 7 Allure du puissance électromagnétique

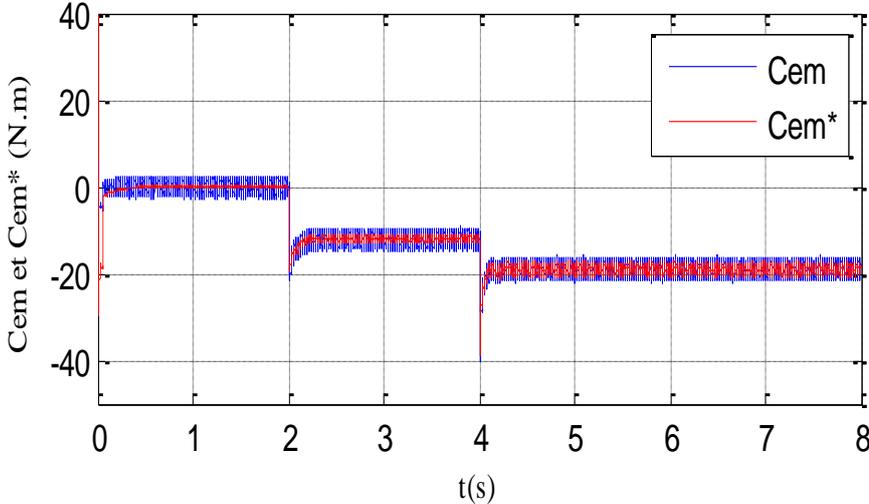


Figure III 8 Allure du couple électromagnétique

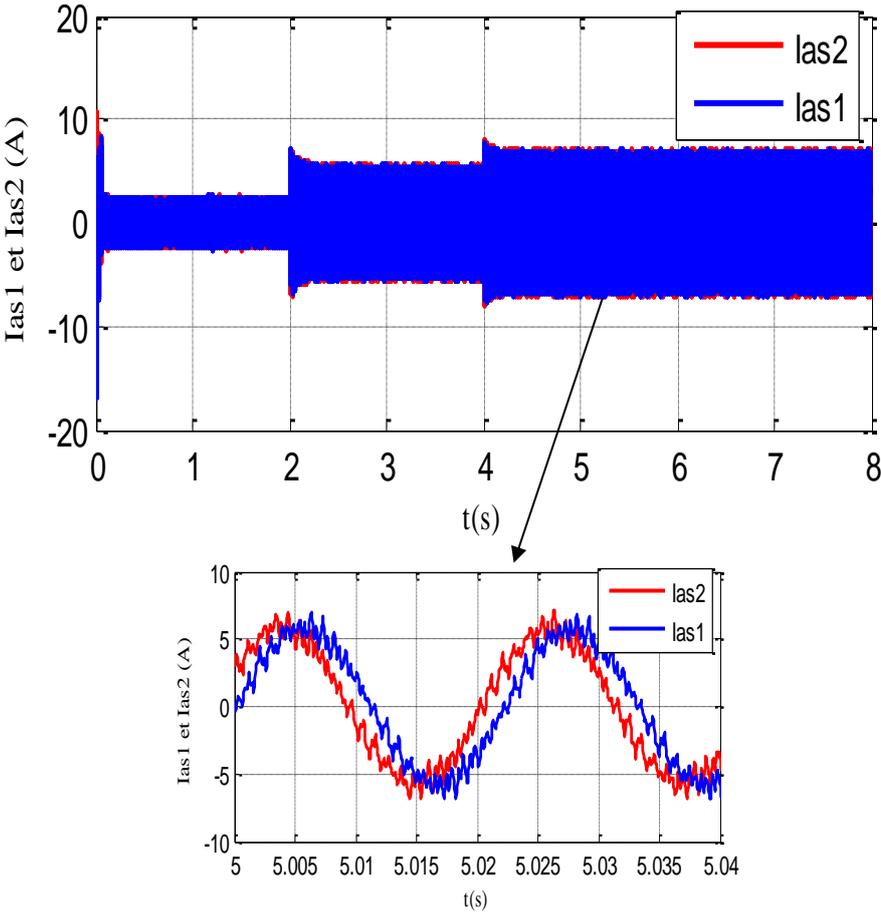


Figure III 9 Allure des courants statoriques des deux étoiles

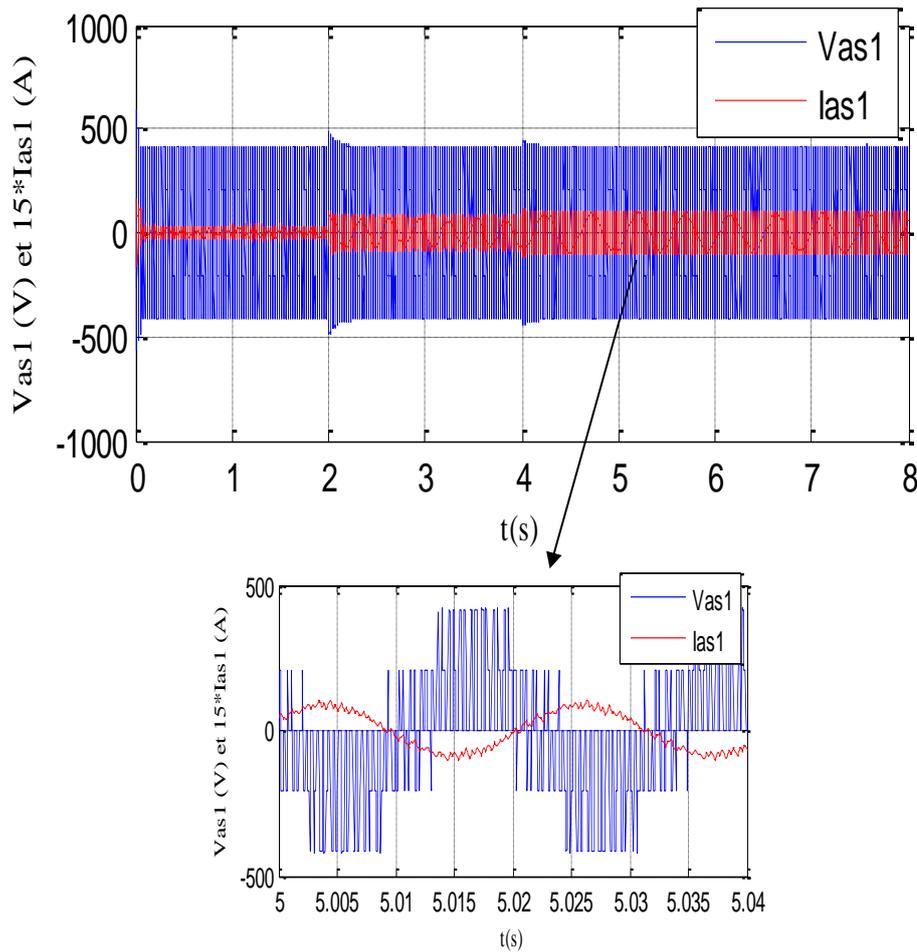


Figure III 10 Allure des courants et tensions statoriques de l'étoile 1

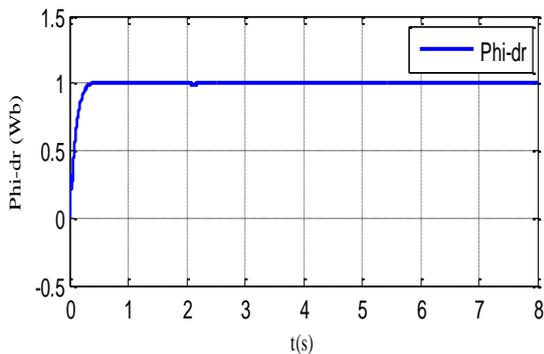


Figure III 11 Allure de flux rotorique direct

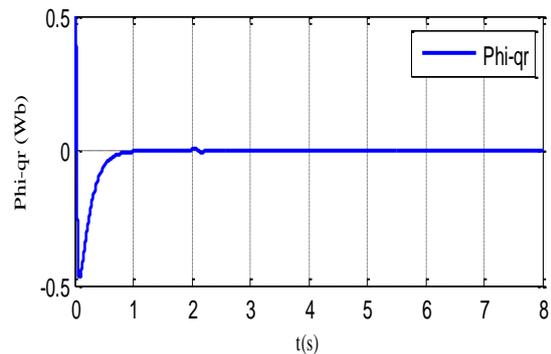


Figure III 12 Allure de flux en quadrature

III.7.2 Influence de la variation de la vitesse d'entraînement

Le système global, utilisant le schéma de la commande vectorielle de la figure (III.5) a été simulé. Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats de simulation obtenus pour une vitesse d'entraînement variable et une charge fixe.

Chapitre III *Contrôle d'un système éolien en fonctionnement autonome*

Dans un premier temps, la génératrice est entraînée à la vitesse de (314tr/mn). A l'instant $t=2s$, la vitesse est augmentée à (360tr/mn) puis à l'instant $t=4s$, elle est diminuée pour atteindre (250tr/mn) et a l'instant $t=8s$ la vitesse augment jusqu'à (330tr/mn) comme elle est présenté dans la figure (III.13), puis on appliquant un profil de vent comme elle montrée dans la figure (III.19). Il est à noter que le cas de faible variation de vitesse a uniquement pour but un caractère illustratif.

Dans les deux cas, la tension de bus continue est bien contrôlée comme le montrent les figures (III.14) et (III.20).

L'analyse des figures (III.15)-(III.16)-(III.17) et (III.18) a permis de voir le comportement du la puissance électromagnétique, le couple électromagnétique , la puissance électrique et le couple électrique respectivement en fonction de la variation de vitesse, où on constate que la puissance électrique et le couple électromagnétique sont insensibles à cette variation, contrairement au couple électrique et la puissance électromagnétique qui sont influencés par cette variation, elles répondant aux différentes variation de vitesse.

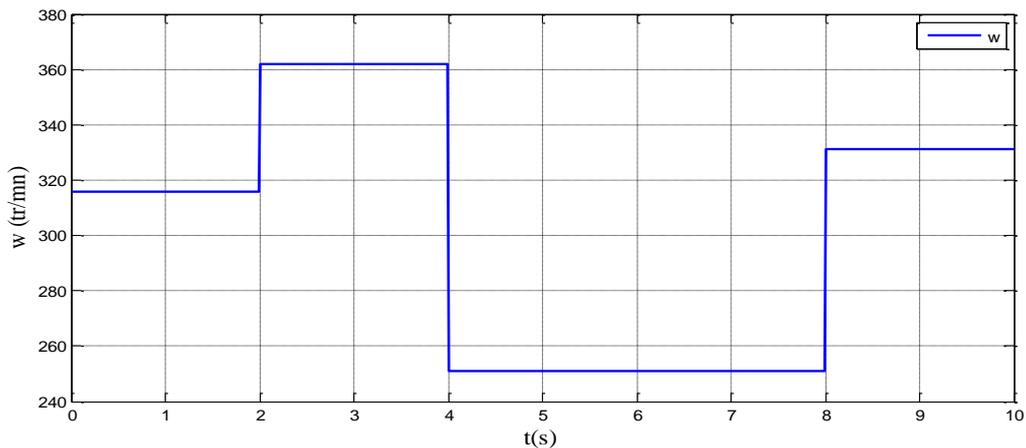


Figure III 13 Vitesse d'entraînement

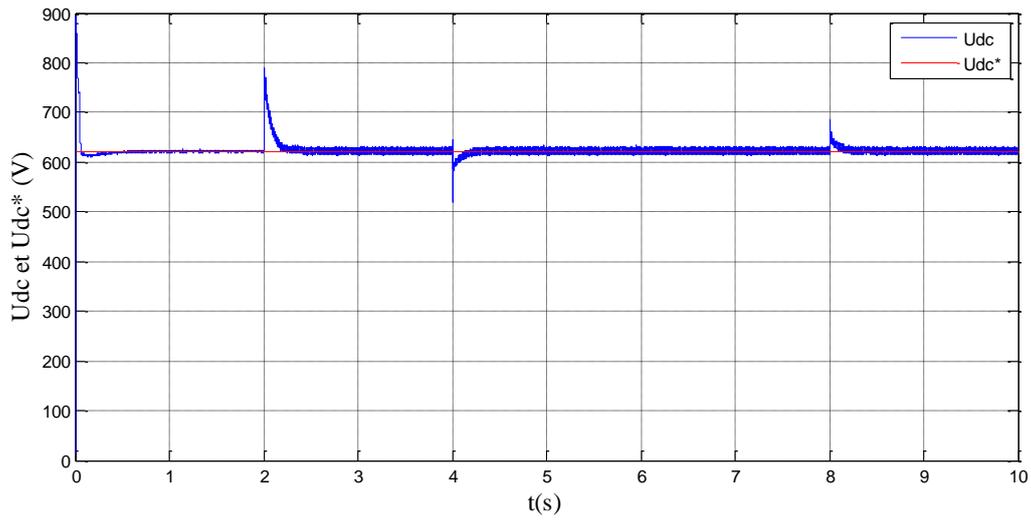


Figure III 14 Allure de la tension du bus continu

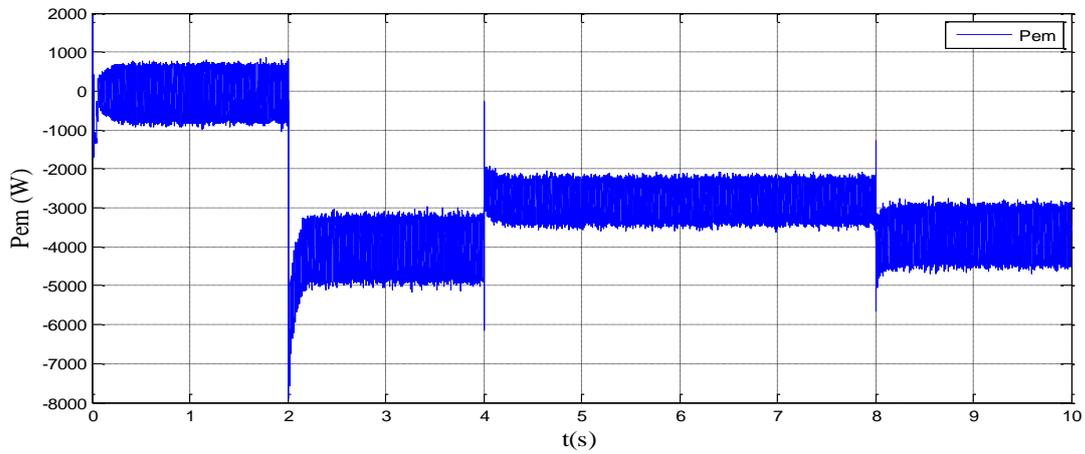


Figure III 15 Allure de la puissance délivrée

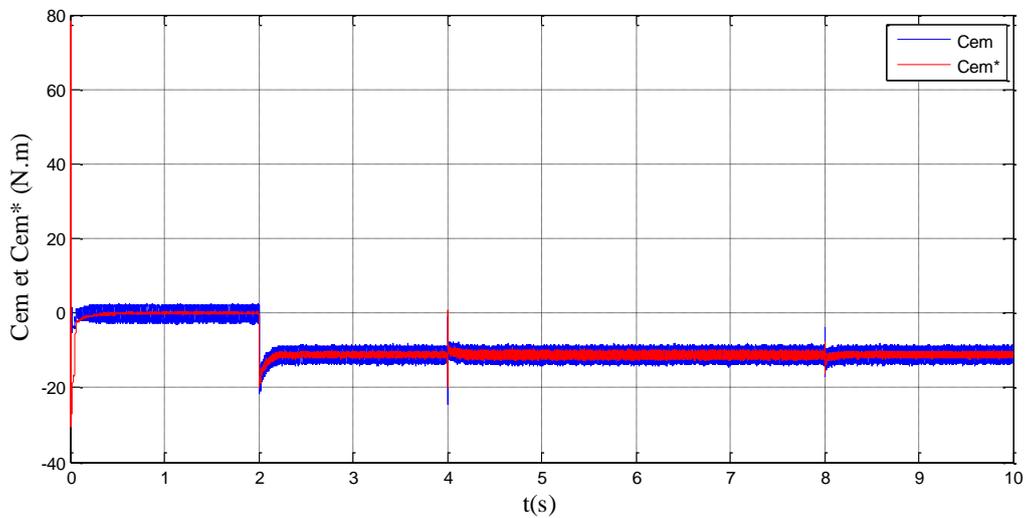


Figure III 16 Allures de couple électromagnétique et sa référence

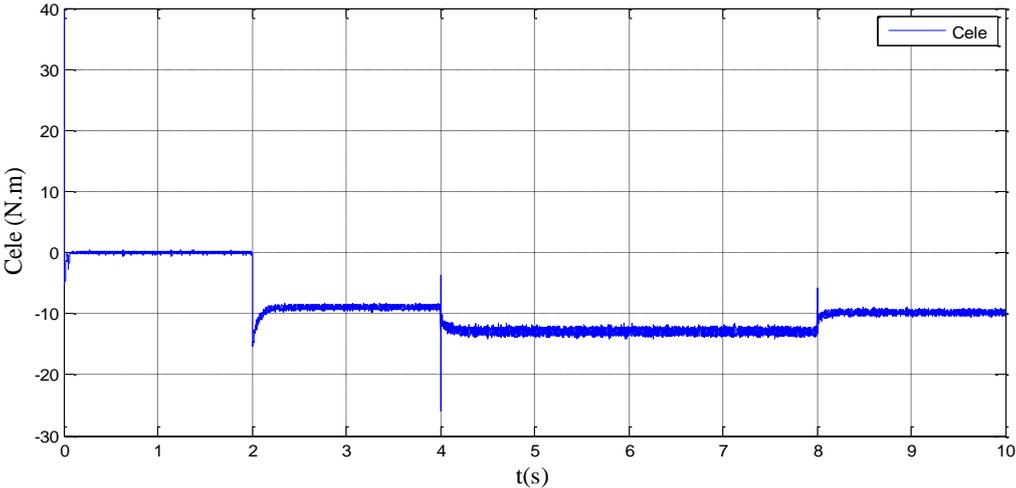


Figure III 17 Allures de couple électrique

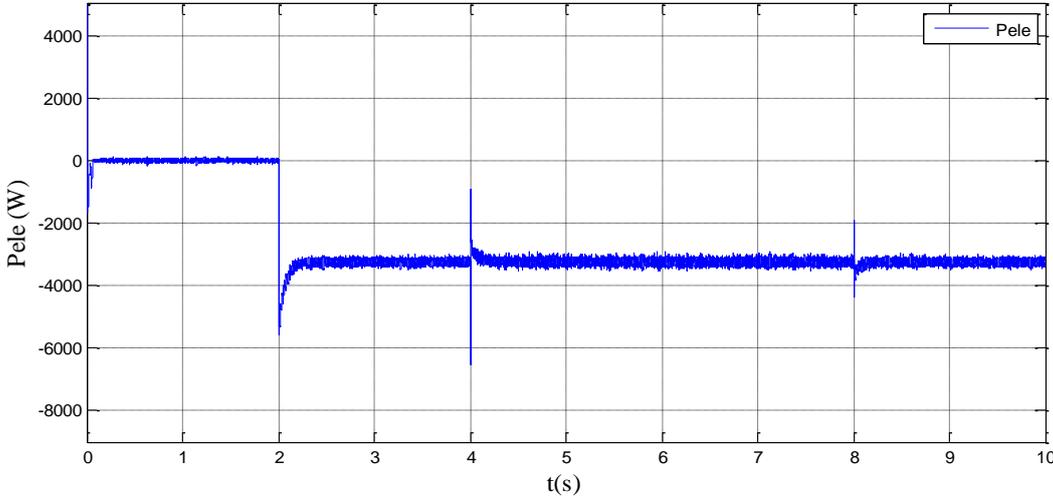


Figure III 18 Allure de puissance électrique

➤ Application de profil de vent

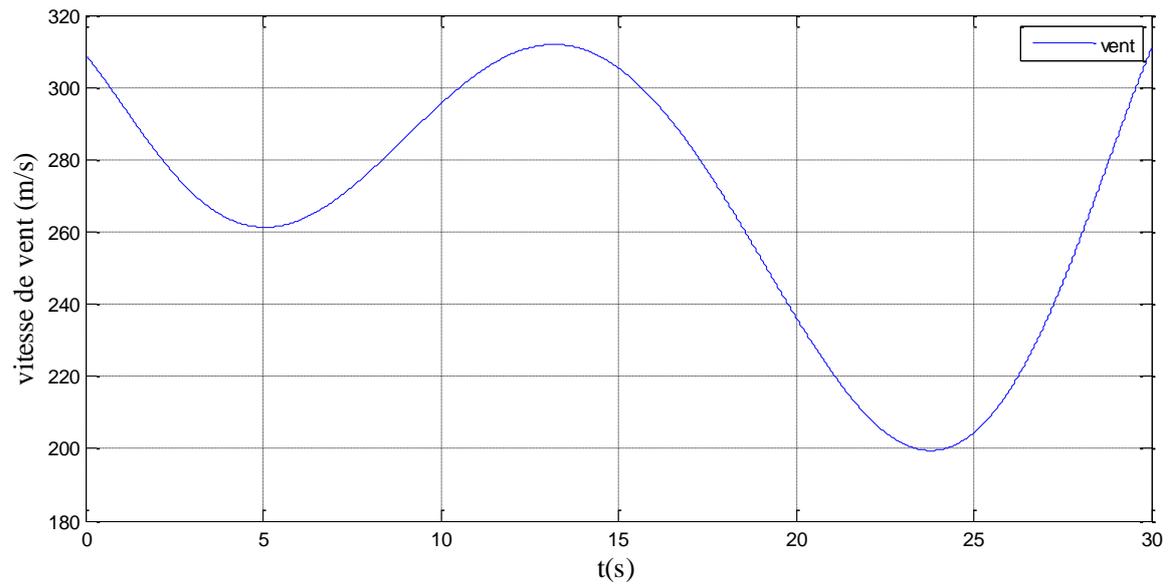


Figure III 19 Allure de profil de vent

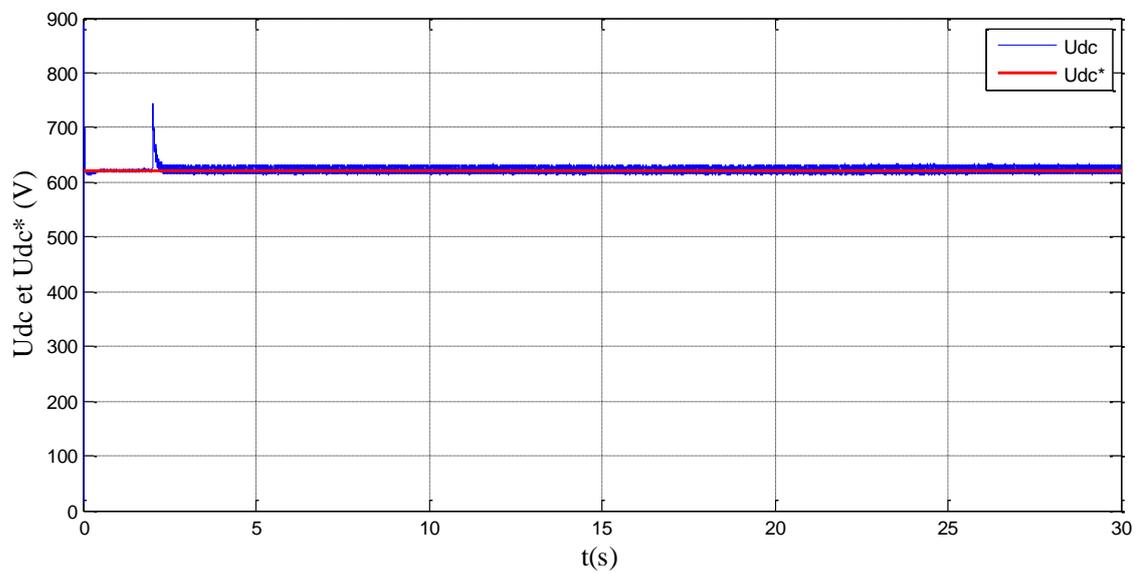


Figure III 20 Allure de la tension du bus continu

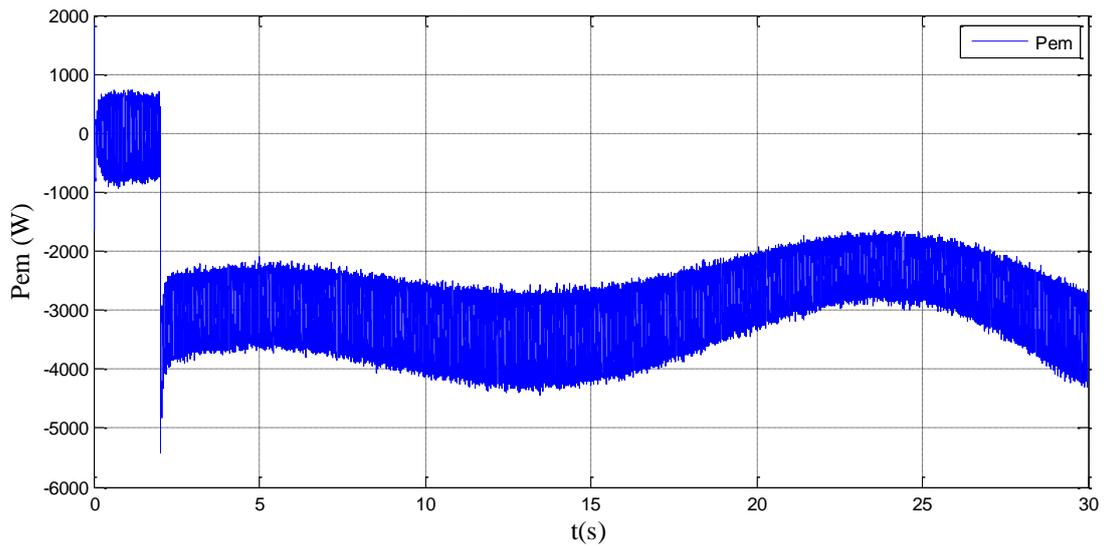


Figure III 21 Allure de la puissance délivrée

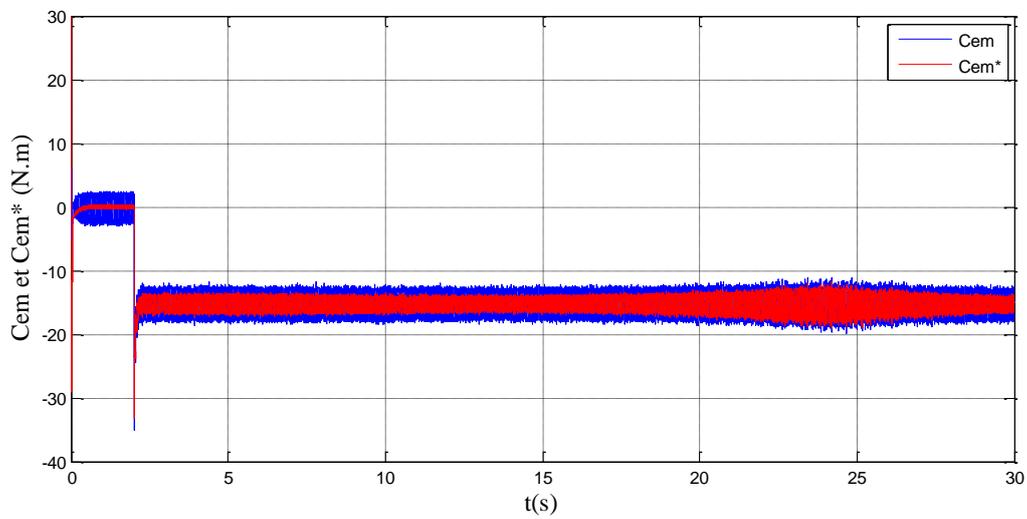


Figure III 22 Allures de couple électromagnétique et sa référence

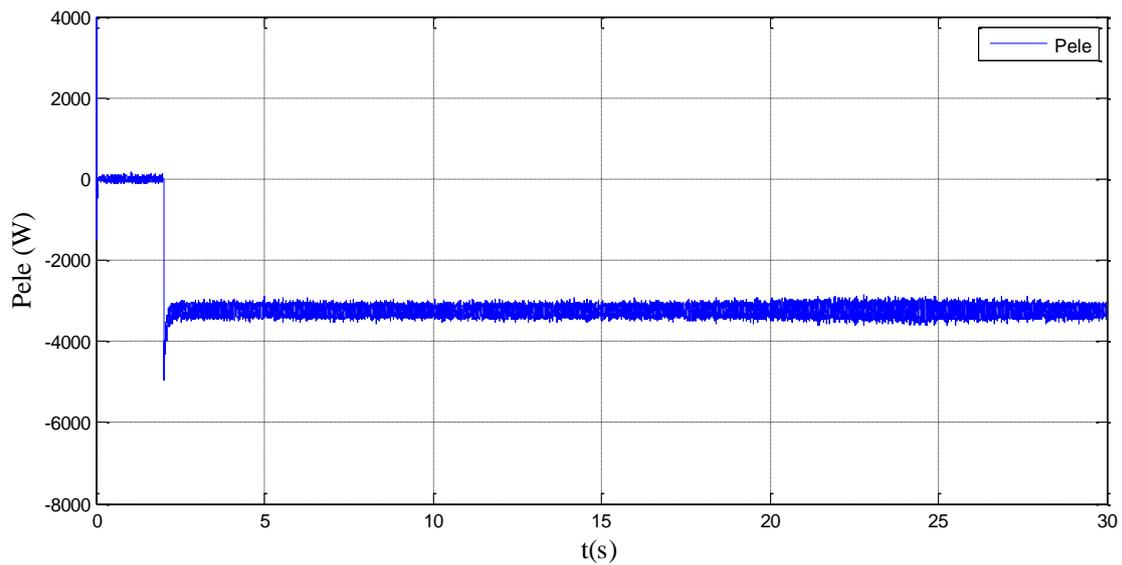


Figure III 23 Allure de puissance électrique

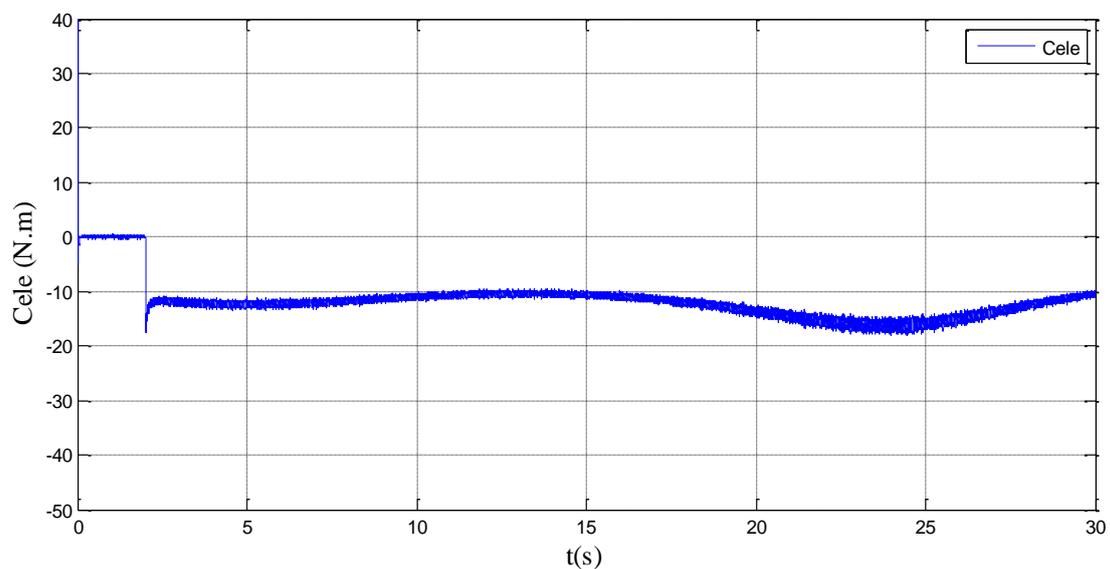


Figure III 24 Allures de couple électrique

III.8 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la génératrice asynchrone double étoile exploitée dans des sites autonomes. Nous avons étudié la méthode indirect avec régulation de bus continu.

Chapitre III *Contrôle d'un système éolien en fonctionnement autonome*

Durant la simulation on a étudié le comportement de la génératrice, dont on a varié la charge on fixant sa vitesse et la tension de bus continu. Ensuite on a varié la vitesse dont on a appliqué un profil de vent et on a gardé la charge fixe, Enfin nous avons interprété et commenté les résultats obtenues.

A red scroll graphic with a white border and a white shadow. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curled up. The text is centered on the unrolled portion.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à l'étude de la machine asynchrone à double étoile en vue de son intégration dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne en fonctionnement autonome.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système éolien, puis nous sommes intéressés aux systèmes autonomes et les différents architectures existants selon le type du générateur adopté et plus précisément la configuration basée sur une machine asynchrone à double étoile comme génératrice, puis on a cité quelques avantages et inconvénients des machines multiphasées.

Le second chapitre était dédié à la description et à la modélisation des différentes parties de l'aérogénérateur ainsi que la MASDE dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park que nous avons développée, puis celle des convertisseurs associés. La simulation a été réalisée sous le logiciel Matlab/Simulink.

Le dernier chapitre est dédié à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique, qui a un principe similaire à celui de la M.C.C à excitation séparée. Nous avons appliqué la méthode indirecte avec régulation de bus continu pour mieux mettre en évidence sur les caractéristiques de la commande sur la GASDE.

Durant la simulation on a étudié le comportement de la génératrice, dont on a varié la charge et on a fixé sa vitesse de rotation, ensuite on a varié la vitesse de rotation dont on a appliqué un profil de vent ou on a gardé la charge fixe. Enfin nous avons interprété et commenté les résultats obtenus.

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

- Utiliser une autre technique de commande comme la DTC.
- Association d'un système de stockage d'énergie.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] M. Angel, C. Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électrique », thèse doctorat, institut nationale des sciences appliquées de toulouse, 2006.
- [2] L. Debbou, D. Maghribi « Commande d'un système hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie », mémoire d'ingénieur d'état en électromécanique ,université de béjaia, 2009.
- [3] M.Lakhdari «Simulation et commande de la machine asynchrone double étoile pour aérogénération », mémoire de magister, université ferhat abbas-setif-1,2014.
- [4] A.Khattara « Modélisation commande et gestion de l'énergie d'un générateur éolien », thèse doctorat, biskra, 2014.
- [5] M. Lefranc. H. Mikkelsen. « Conception d'éoliennes». Projet de fin d'études d'insa de strasbourg. 2008.
- [6] A. Attar, « Les énergies nouvelles ou renouvelables », ancien PDG de Sonatrach et ancien ministre des ressources en eau thèse de doctorat, 2012.
- [7] F. Poitiers «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» thèse de doctorat, université de nantes, 2003.
- [8] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo,C. Nichita «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002.
- [9] <https://www.connaissancedesenergies.org/leolien-en-europe-et-dans-le-monde-en-2018-190227>.
- [10] http://www.energies-renouvelables.org/energies_renouvelables.asp.
- [11] J. Martin, « Energies éoliennes», techniques de l'ingénieur, traité de génie énergétique,

Références Bibliographiques

B 8 585 1- B 8 585 21.

[12] Axenne, «Petit éolien» usages raccordes au réseau, conseil général des Landes, 2008.

[13] R .Redjem « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne », mémoire de magister. Université de mentouri de constantine, 2009.

[14] O. De Vries, «On the theory of the horizontal axis wind turbine», Ann. Rev. Fluid. Mech.1983.

[15] M. Faid, F. Khirredine «Etude et simulation d'une génératrice asynchrone double étoile en fonctionnement autonome» mémoire de fin de cycle. Université de bejaia, 2015.

[16] L .Hama, M.Kekouche «Etude et commande d'une machine asynchrone double étoile» mémoire de fin de cycle, université de bejaia, 2014.

[17] D. Seyoum, M. F. Rahman et C. Grantham ,« Terminal voltage control of a wind turbine driven isolated induction generator using stator oriented field control », applied power electronics conference and exposition (APEC'03), eighteenth annual IEEE, vol. 2, miami beach, 2003.

[18] F. A. Farret, B. Palle et M. G. Simoes– « Full expandable model of parallel self-excited induction generators », IEE Proc-Electr, power appl, 2005.

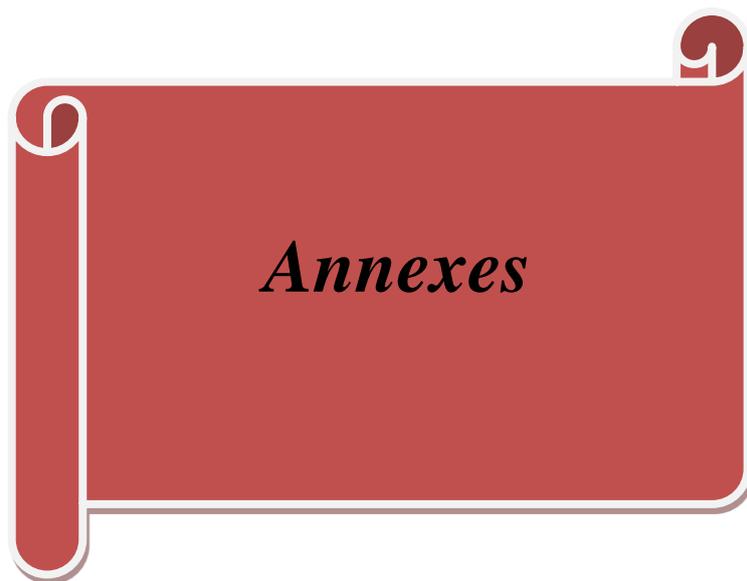
[19] O. Gergaud, B. Multon et H. Ben Ahmed – « Modélisation d'une chaine de conversion éolienne de petite puissance », électrotechnique du futur, nancy, 2001.

[20] H. Camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de Doctorat, école nationale supérieur d'arts et métiers, centre de bordeaux, 2003.

[21] Y.Djeriri «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle» thèse de doctorat en électrotechnique. Université sidi bel-abbès, 2015.

Références Bibliographiques

- [22] A.Boyette «Contrôle-commande d'un générateur asynchrone double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne», thèse de doctorat en génie électrique, université henry poincaré, nancy 1,2006.
- [23] K. Idjdarene « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », thèse de doctorat en électrotechnique. Université de béjaia, 2010.
- [24] I.Sebihi «Etude du générateur asynchrone auto-excitée pour l'utilisation dans le système éolienne », master en électrotechnique. Université kasdi merbah ouargla,2014.
- [25] S. Chekkal «Intégration des génératrices asynchrones à double étoiles dans un système éolien», thèse de doctorat en science de l'université de bejaia, 2015.
- [26] M.fahem , N.Habis, «Etude de la machine asynchrone à double étoile en vue de son intégration dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne», mémoire de fin d'étude de l'université de sidi-bel-abbes,2019.
- [27] D.Aouzellag, K.Ghedamsi, E. M.Berkouk, «Network power flux control of a wind generator», Renewable Energy» journal, 2009.
- [28] K.Ghedamsi ,D.Aouzellag , Berkouk EM. «Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system». renewable energy, 2008.
- [29] D. Hadiouche, «Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structures», thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2001.
- [30] E.Merrabet « Amélioration des performances de régulation d'une machine double étoile par les techniques de l'intelligence artificielle», thèse doctorat. Université hadj lekhdar batna algérie, 2013



Annexes

Annexe

Annexe

Les paramètres de la GASDE

○ Puissance nominale	$P_n = 4,5 \text{ KW}$
○ Tension nominale	$V_n = 220 \text{ V}$
○ Courant nominale	$I_n = 6,5 \text{ A}$
○ Résistance du premier enroulement statorique	$R_{s1} = 3,72 \Omega$
○ Résistance du deuxième enroulement statorique	$R_{s2} = 3,72 \Omega$
○ Résistance rotorique	$R_r = 2.12 \Omega$
○ Inductance du premier enroulement statorique	$L_{s1} = 0,022 \text{ H}$
○ Inductance du deuxième enroulement statorique	$L_{s2} = 0,022 \text{ H}$
○ Inductance rotorique	$L_r = 0,006 \text{ H}$
○ Inductance mutuelle	$L_m = 0,3672 \text{ H}$
○ Moment d'inertie	$J = 0,0625 \text{ kg.m}^2$
○ Coefficient de frottement	$K_f = 0,001 \text{ N.m.s /rad}$
○ Fréquence nominale	$f = 50 \text{ Hz}$
○ Nombre de paires de pôles	$P = 1$