

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 électrique

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Option : commandes électriques énergies renouvelables

Thème

Pompage éolien à base d'une machine asynchrone à double étoile

Présenté par :

- Mr TIDJET TARIK (commandes électriques)
- Mr CHAABNA HALIM (énergies renouvelables)

Examineurs :

- Mme ROHA
- Mme BELAID

Promoteurs :

- Mr H.AMIMEUR
- Mr K .HAMITOUCHE

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciement

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 **Mr H.AMIMEUR**, 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 K.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'électrotechnique 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 remercie 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 (Mélissa, Karima, Sarah et Thiziri)*

✓ *À mes frères (Habib et Norddine)*

✓ *À toutes ma famille*

✓ *À tous mes amis*

HALIM CHAABNA

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 ma sœur*

➤ *À mes frères*

➤ *À mes grands parents*

➤ *À toute ma famille*

➤ *À tous mes amis*

➤ *À mon cousin toufik*

TARIK TIDJET



sommaire

Sommaire

Abréviations	I
Notations	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII

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

Chapitre I: Généralités sur les éoliennes

I.1	Introduction	3
I.2	Les différents sources des énergies renouvelables	3
I.3	Energie solaire	4
I.4	Energie hydraulique.....	5
I.5	La géothermie	5
I.6	La biomasse	6
I.7	Source éolien	7
I.8	Historique	8
I.9	Définition de l'énergie éolienne	9
I.10	Quelques notions sur le vent.....	9
I.11	Energie éolienne en Algérie	10
I.11.1	Gisement éolien en Algérie	11
I.11.2	Projet à faire en l'Algérie	11
I.12	Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolien	12
I.12.1	Avantages	12
I.12.2	Inconvénients	12
I.13	L'aérogénérateur.....	13
I.14	Les composants d'une éolienne.....	13
I.14.1	La tour	14
I.14.2	La nacelle	14
I.14.3	Le rotor et les pales	15
I.14.4	Le moyeu.....	15
I.15	Types des éoliennes	15
I.15.1	Aérogénérateur à axe horizontal.....	15
I.15.2	Aérogénérateur à axe vertical.....	16

Sommaire

I.16	Technologies de fonctionnement des systèmes éoliens.....	18
I.16.1	Fonctionnement à vitesse fixe	18
I.16.2	Fonctionnement à vitesse variable	19
I.17	Différentes machines utilisées par les systèmes éoliens.....	20
I.17.1	Système éolienne à base d'une génératrice synchrone.....	20
I.17.2	Système éolienne à base d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil	21
I.17.3	Système éolien à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation	22
I.17.3.1	Structure à énergie rotorique dissipée	22
I.17.3.2	Structure à rotor bobiné	22
I.17.4	Système éolienne à base d'une génératrice à double étoile	23
I.18	Stockage de l'énergie éolienne	24
I.18.1	Techniques de stockage à grande échelle.....	25
I.18.2	Technique de stockage à moyenne et faible échelles.....	25
I.19	Conclusion	25
<i>Chapitre II: Modélisation et simulation de la machine asynchrone à double étoile</i>		
II.1	Introduction	27
II.2	Description de la machine asynchrone double étoile	27
II.3	Hypothèses simplificatrices	28
II.4	Modèle de la machine asynchrone à double étoile	28
II.4.1	Les équations électriques	28
II.4.2	Equations magnétiques.....	29
II.4.3	Expression du couple électromagnétique	31
II.4.4	Equation mécanique	31
II.5	Modèle biphasé de la MASDE	32
II.5.1	Transformation de park	32
II.5.2	Choix du référentiel.....	33
II.5.2.1	Référentiel lié au stator	33
II.5.2.2	Référentiel lié au rotor	33
II.5.2.3	Référentiel lié au champ tournant	33
II.5.3	Equations électriques et magnétiques.....	34
II.5.4	Puissance absorbée et couple électromagnétique.....	34
II.5.5	Représentation d'état de la MASDE	35
II.6	Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande MLI.....	36

Sommaire

II.6.1	Modélisation de l'onduleur de tension	36
II.6.2	Commande par modulation sinus-triangle	38
II.6.3	Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI	38
II.7	Simulation et interpretation des resultats.....	39
	Interprétation des résultats	43
II.8	Conclusion	43
<i>Chapitre III: Commande vectorielle de la machine asynchrone à double étoile</i>		
III.1	Introduction	44
III.2	Modélisation du système éolienne	44
III.2.1	Modélisation de la vitesse du vent	44
III.2.2	Zone de fonctionnement d'une éolienne	44
III.2.3	Modélisation de la turbine.....	45
III.2.4	Modélisation du multiplicateur	46
III.2.5	Modélisation de l'arbre de la machine	47
III.3	Convertisseurs statiques.....	47
III.3.1	Le redresseur	47
III.4	Modélisation de Bus continu	48
III.5	Commande vectorielle	49
III.5.1	Principe de la commande vectorielle	49
III.5.2	Théorie du flux oriente	50
III.5.3	Différentes méthodes de la commande vectorielle.....	50
III.5.3.1	Méthode de commande directe	50
III.5.3.2	Méthode de commande indirecte	50
III.5.4	Commande vectorielle indirecte.....	51
III.5.5	Principe du défluxage.....	53
III.5.6	Application de la commande vectorielle pour la GASDE	53
III.5.7	Simulation et interprétation des résultats	54
III.5.7.1	Influence de la variation de la charge	54
III.5.7.2	Influence de la variation de la vitesse d'entraînement.....	59
III.6	Conclusion	60

Chapitre IV: Dimensionnement du système du pompage éolienne

Sommaire

IV.1	Introduction.....	61
IV.2	Généralités sur le pompage	61
IV.2.1	Définition de la pompe	61
IV.2.2	Les différents systèmes de pompage	61
IV.2.2.1	Pompage mécanique	61
IV.2.2.2	Le pompage électrique	62
IV.2.3	Type de pompes utilisées	63
IV.2.3.1	Pompe volumétrique	63
IV.2.3.2	Pompe centrifuge	63
IV.3	Modélisation du groupe motopompe	64
IV.3.1	Modélisation de la pompe centrifuge	64
IV.3.2	Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil	65
IV.3.2.1	Equation d'état de la machine asynchrone.....	66
IV.4	Dimensionnement du système de pompage éolienne	67
IV.4.1	Dimensionnement du groupe motopompe	67
IV.4.2	Dimensionnement de la génératrice asynchrone double étoile	67
IV.5	Simulation du système globale	68
IV.6	Interprétation des résultats de simulation	71
IV.7	Conclusion	71
	Conclusion générale	72

Bibliographie

Annexe



***Principales
notations et abréviations***

Liste des 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 ; 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 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

Liste des abréviations

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 1 et 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]
$[V_{s1}], [V_{s2}], [V_r]$	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 [$^\circ$]
$\varphi_{a,b,cr}$	Flux triphasé 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]

Liste des abréviations

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
J_m	Inertie de la machine.
J_t	Initie de la turbine
C_g	Couple statique fournie par l'éolienne.
f_m	Coefficient de frottement de la machine.
H_g	Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation
P_c	Pert de charge produite par le frottement de l'eau sur les parois des conduites
λ	Coefficient des pertes de charge linéaires.
D	Diamètre de la tuyauterie(m)
L	Longueur de la tuyauterie(m)
g	Accélération de la pesanteur locale (m/S ²)
ε	Coefficient des pertes de charge locales.
K_p	Constante de la canalisation.
Q	Le débit de la pompe.
$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2:$	Des constantes de la pompe.
K_r	coefficient de proportionnalité[(Nm/ras . S ⁻¹) ²]

Liste des notions

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
MCC	Machine à Courant Continu
MRV	Machine à reluctance variable
MAS	Machine asynchrone
GSAP	Génératrice Synchronne à Aimants Permanents
GS	Génératrice Synchronne
GAS	Génératrice Asynchrone à Cage
GASDE	Génératrice asynchrone double étoile
PI	Proportionnel-Intégrale
STATCOM	Static Var Compensator



***Liste
des figures***

Listes des figures

Figure I.1: Les énergies renouvelables	5
Figure I.2: Energie solaire.....	6
Figure I.3 : l'énergie hydraulique	7
Figure I.4 : centrale géothermique	7
Figure I.5 : centrale de biomasse	8
Figure I.6: source éolienne	9
Figure I.7 : ancien moulin a vent	10
Figure I.8 : gisement éolien en Algérie.....	13
Figure I.9 : Première ferme éolienne en Algérie.....	13
Figure I.10 : schéma de fonctionnement d'un éolien	15
Figure I.11 : les composants d'une éolienne	16
Figure I.12 : éolienne à axe horizontal.....	18
Figure I.13 : structure de savonius	19
Figure I.14 : structure darrieus	19
Figure I.15 : Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.	20
Figure I.16 : Eolienne à vitesse variable à base de la machine asynchrone à cage.....	21
Figure I.17 : éolien basé sur la machine synchrone	22
Figure I.18 : éolien basé sur la machine synchrone a aimant permanent	23
Figure I.19 : éolien basé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil	23
Figure I.20 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation, régulation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor.....	24
Figure I.21 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation, régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation.....	25
Figure I.22 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à double étoile	26
Figure II.1 : Représentation schématique des enroulements de la MASDE	29
Figure II.2 : passage du système abc au système dqo	34
Figure II.3 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé	39
Figure II.4 : association MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI	41
Figure II.5 : schéma bloc global de simulation de la MASDE alimentée par deux onduleurs MLI.....	42
Figure II.6 : évolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs de tension MLI, suivi de l'application des charges $C_r=14$ et $C_r=-14$ respectivement entre les intervalles de temps $t= [2\ 4]$ et $t= [6\ 8]$	45
Figure III. 1: courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent	47
Figure III. 2: multiplicateur de vitesse	49
Figure III. 3: schéma représentatif d'un redresseur à diodes en pont de graetz.....	50
Figure III. 4: Représentation du bus continu	51
Figure III. 5: principe de pilotage de la MCC et de la MASDE.....	52
Figure III. 6: Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC)	53
Figure III. 7: Schéma de défluxage	56
Figure III. 8: Schéma global du système étudié	56

Listes des figures

Figure III. 9: schéma block de la commande vectorielle de la GASDE.....	57
Figure III. 10: Allure de la tension de bus continu	58
Figure III. 11: Allure de puissance électromagnétique.....	58
Figure III. 12: Allure du couple électromagnétique	59
Figure III. 13: Allure des courants statorique des deux étoiles	59
Figure III. 14: Allure du courant et tension statoriques.....	60
Figure III. 15: Allure du flux rotorique direct et	61
Figure III.16: Allure du flux en quadrature.....	61
Figure III. 17: Vitesse d'entraînement.....	62
Figure III. 18: Allure de la tension de bus continu	62
Figure III. 19: Allures de couple électromagnétique et sa référence.....	62
Figure VI.1: schéma d'une éolienne multi-pale	64
Figure VI.2: schéma d'un aérogénérateur aliment une pompe.....	64
Figure VI.3: pompe volumétrique (pompe à piston)	65
Figure VI.4: schéma d'une pompe centrifuge	66
Figure VI.5 : Schéma global du système étudié	70
Figure VI.6: Allure de la tension de bus continu	71
Figure VI.7: Allure de couple électromagnétique du la MAS	71
Figure VI.8: Allure de la vitesse de rotation du MAS	71
Figure VI.9: Allure du débit d'eau	72
Figure VI.10: Allure de la hauteur manométrique.....	72
Figure VI.11: Allure de couple résistant de la MAS	72



***Listes des
tableaux***

Liste des tableaux

Tableau I.1 :l'échelle beaufort10



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

La forte demande en énergie électrique basée sur les énergies fossiles telles que le pétrole et le charbon ont influencé directement les réserves fossiles ainsi que l'environnement planétaire. Afin de garder la même cadence économique mondiale et préserver une vie naturelle pour nos générations futures, il est nécessaire de trouver d'autres sources d'énergies alternatives, durables et propres, ce qui nécessite une intervention au niveau mondial pour atteindre ces objectifs [33].

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé les risques de pénurie les matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique. Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont signalé que : «la production des gaz à effet de serre, tels que : l'oxyde nitreux (N₂O), le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄) sont responsables de l'échauffement climatique à cause de l'évolution des combustibles fossiles », ils sont engagés dans le *Protocole de Kyoto* doivent donc multiplier leurs actions dans le secteur de la production d'énergie électrique afin de développer des sources d'énergies renouvelables, propres et inépuisables, ces dernières représentent un gisement considérable au niveau mondial [34].

L'énergie éolienne est générée par le vent qui fait tourner les turbines en transformant l'énergie cinétique en énergie électrique. L'éolienne peut générer des mégawatts et surtout les éoliennes offshore où on trouve plus d'espace et des vents en se basant sur différentes machines électriques qui 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 multi-phasées ont par la suite fait un intérêt important, en particulier la machine asynchrone double étoile (MASDE), qui présente plusieurs avantages. En effet, les variateurs multi-phasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées, tels que : segmentation de puissance, minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques, réduction des courants harmoniques, grande fiabilité et forte puissance, etc. [35].

Notre objectif dans ce travail consiste à l'étude d'un pompage éolien à base d'une machines asynchrone double étoile, 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.

Dans le premier chapitre on donnera quelques généralités et définitions des différent source de l'énergie renouvelable, un aperçue générale sur l'énergie éolienne, son fonctionnement, ainsi les machines utilisées par l'éolienne leur avantages et inconvénients.

Dans le second chapitre on modélise dans un premier temps la machine asynchrone à double étoile (MASDE), nous développons un modèle biphasé sur la transformation de Park dans le

Introduction générale

but de réduire la complexité du système et de faciliter sa mise en équation. Ensuite nous passerons à l'association de la MASDE aux onduleurs de tensions à commande MLI, finalement, des résultats de simulations seront présentés et commentés.

Le troisième chapitre sera consacré en première lieu à la modélisation de la chaîne de conversion de l'éolienne. En deuxième lieu on passe à l'étude du principe de la commande vectorielle d'une GASDE par orientation de flux, 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.

Dans le dernier chapitre on présente un dimensionnement du système globale étudié (système pompage éolienne basé sur la GASDE), on a terminé par faire la simulation de ce système puis on a donné les résultats de simulation

Enfin les principaux résultats de ce travail et les perspectives sont données dans une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les éoliennes

I. Généralités sur les éoliennes

I.1 Introduction

Vue la diminution des énergies fossile et les problèmes environnementaux causant par ces énergies ainsi l'augmentation mondiale de la consommation de l'énergie électrique, cela fait appel à la recherche d'autres énergies durables moins polluantes pour l'environnement.

Les énergies renouvelables en sont là pour résoudre ce problème, en particulier l'énergie éolienne qui a énormément évolué ces dernières années.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes sources de l'énergie renouvelable, en particulier un aperçu général sur l'énergie éolienne, son fonctionnement, ainsi les machines utilisées par l'éolienne.

I.2 Les différentes sources des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. L'expression d'énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergies renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelables » qui sont plus correctes d'un point de vue physique. Les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois. [1]



Figure I.1: Les énergies renouvelables

On peut classer les sources des énergies renouvelables comme suit :

I.3 Energie solaire

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- L'énergie solaire thermique qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. Nous pouvons aussi produire l'électricité avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité ;
- L'énergie solaire photovoltaïque qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon. Au niveau des sites isolés ou non raccordés au réseau conventionnel, nous pouvons ainsi assurer : L'électrification rurale et le pompage de l'eau (50%), Les télécommunications et la signalisation (40%), Les applications domestiques (10%). L'énergie solaire passive est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.



Figure I.2: Energie solaire

➤ Avantages

- une bonne source d'énergie renouvelable ;
- Peu de soutiens et durent longtemps ;
- Une énergie non-polluante ;
- La lumière ne coûte rien.

➤ Inconvénients

- Il n'y a pas de lumière la nuit ;
- A besoin de beaucoup d'espace ;
- Le placement peut modifier l'énergie prise dans les panneaux ;
- Panneau fragile.

I.4 Energie hydraulique

Le principe consiste à utiliser l'énergie mécanique de l'eau pour faire tourner une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité. Cette forme d'énergie est essentiellement produite en contrebas des barrages hydrauliques et parfois à travers des cours d'eau et canaux artificiels à l'aide de microcentrales. La puissance produite dépend de la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau. Il existe aussi de par le monde d'autres procédés de génération électrique à travers l'exploitation de l'eau comme l'utilisation des mouvements des vagues marines et des marées, ou des courants sous-marin.[36]



Figure I.3 : l'énergie hydraulique[36]

- **Avantages**
 - Une énergie naturelle non polluante ;
 - L'eau est autour du monde entier.
- **Inconvénients**
 - perturbation de l'équilibre écologique ;
 - Grand barrage couteux.

I.5 La géothermie

Le principe consiste à exploiter les anomalies de températures existant dans le sous-sol à travers l'utilisation des eaux thermales pour le chauffage, ou la production d'électricité dans des centrales géothermiques utilisant la vapeur d'eau qui sort en surface (geysers) ou extraite du sous-sol par des forages. C'est une énergie très propre et peu couteuse mais très localisée dans de rares régions où il existe des anomalies géothermiques.



Figure I.4 : centrale géothermique

➤ **Avantages**

- Pollution non-toxique ;
- Beaucoup d'énergie pour peu de place.

➤ **Inconvénients**

- Répartitions des sources ;
- Le transport de l'énergie des usines ;
- Installation couteuse.

I.6 La biomasse

Le principe consiste à transformer des matières ou déchets renouvelables d'origine végétale ou organique en énergie en les brûlant, en les laissant pourrir (fermentation), ou en les transformant chimiquement. L'incinération en tant que combustible du bois, des déchets agricoles, domestiques, ou industriels, est largement utilisée à travers tous les pays, pour produire de la chaleur essentiellement dans la mesure où une tonne de déchets organiques secs équivaut à une tonne de charbon.

Par contre la transformation chimique de certains déchets par putréfaction sert à produire du biogaz composé essentiellement de méthane. La fermentation alcoolique ou la distillation est de nos jours de plus en plus utilisée pour produire des biocarburants dont les avantages et les inconvénients font cependant l'objet d'une véritable polémique à l'échelle mondiale du fait de la compétition avec les cultures alimentaires. Il existe plusieurs filières dites de première ou de deuxième génération pour produire des biocarburants pouvant être utilisés directement dans les moteurs diesels ou adaptés : - L'huile végétale brute à partir d'espèces végétales oléifères (palmier à huile, tournesol, etc.) - L'alcool ou l'éthanol (cane à sucre, betterave, maïs, blé, ...etc.). - Le biogaz issu de la fermentation de matières organiques animales ou végétales riches en sucres. Dans la filière de deuxième génération qui pourrait résoudre le problème de compétition avec les cultures alimentaires, il y a actuellement de nombreux travaux de recherche sur : - La transformation du lignite et de la cellulose en éthanol, en se

basant sur la constatation que les termites possèdent des bactéries qui produisent des enzymes capables de convertir du bois en sucre en 24 heures. - La production d'huile végétale à partir de plantes robuste pouvant pousser en zones arides ou sur des sols salés (exemples de plantes : *Jatropha curcas*, *Pongamia pinnata*).



Figure I.5 : centrale de biomasse

➤ **Avantages**

- C'est une matière première qui est renouvelable. Elle peut être produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable ;
- Biodégradable rapidement ;
- Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques. -Elle dégage autant de CO₂ qu'elle n'en absorbe (les plantes absorbent du CO₂ lors de la photosynthèse) ;
- La biomasse est disponible partout ;
- La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie.

➤ **Inconvénients**

- Les coûts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque ;
- Leur rendement énergétique est assez faible ;
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole ;
- Dégage du CO₂ ;
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement ;
- Provoque la pollution des eaux et des sols.

I.7 Source éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien est l'une des plus prometteuses, l'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux) alliée à la baisse continue des coûts de production (effet de série) font actuellement de l'éolien l'une des énergies renouvelables les plus compétitives. Pour toutes ces raisons l'énergie issue du vent fait déjà partie intégrante du paysage et la tendance s'annonce irréversible [2].



Figure I.6: source éolienne[2]

I.8 Historique

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée par la flotte navale et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau [10].

Il y'a désaccord sur l'origine du concept d'utilisation du vent pour la génération de la puissance mécanique. Certains croient que le concept est originaire de l'ancienne Babylonie. L'empereur babylonien Hammurabi prévoyait d'utiliser l'énergie éolienne pour son ambitieux projet d'irrigation au cours du XVIIe siècle av. D'autres soutiennent que le lieu de naissance des éoliennes est l'Inde. Dans Arthashastra, un travail classique en sanskrit était écrit par Kautilya au 4ème siècle avant notre ère, des références sont vues sur le levage de l'eau avec des dispositifs actionnés par le vent.

Cependant, il n'y a aucun enregistrement pour prouver que ces concepts ont été transformés en matériel réel.

La première conception documentée de moulin à vent remonte à 200 av. Les Perses utilisaient les moulins à vent pour broyer les grains pendant cette période. C'étaient des machines à axe vertical ayant des voiles faites avec des faisceaux de roseaux ou de bois.

La meule a été fixée à l'arbre vertical. Les voiles ont été attachées à l'arbre central en utilisant des entretoises horizontales (figure I.7) [11].



Figure I.7 : ancien moulin a vent

Aux États-Unis, le développement de l'éolienne pour pomper l'eau a été un facteur déterminant permettant l'exploitation de larges étendues ne possédant pas d'accès facile à l'eau nécessaire aux locomotives à vapeur dans les puits [12].

La première éolienne moderne, spécialement conçue pour la production d'électricité, a été construite au Danemark en 1890. Elle a fourni de l'électricité aux zones rurales. Au cours de la même période, un grand générateur d'énergie éolienne doté d'un rotor de 17 m a été construit à Cleveland, Ohio. Pour la première fois, une boîte de vitesses a été introduite dans la conception. Ce système a fonctionné pendant 20 ans générant une puissance évaluée de 12 kW [11].

I.9 Définition de l'énergie éolienne

C'est l'une des formes d'énergie renouvelable, Le nom d'éolienne a été donné aux turbines transformant l'énergie cinétique acquise par l'air propulsé à une certaine vitesse par le vent en énergie mécanique utilisable sur un arbre tournant.

Cette énergie mécanique était utilisée par les anciens moulins pour faire tourner la meule à moudre le grain ou autre denrée ou encore à pomper l'eau du sous-sol pour l'irrigation elle est plutôt utilisée pour la production de l'électricité.

I.10 Quelques notions sur le vent

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents [3].

La vitesse de vent subit également plusieurs types de variation : les phénomènes instantanés tels les rafales, les phénomènes journaliers dus aux rayonnements solaires (max entre 12h et 16h), une graduation a été établie, l'échelle beaufort qui divise les vents en fonction de leur vitesse en 17 catégories (tableau 1) [4].

Degré Beaufort	Vitesse de vent			Description Générale	Pression sue Surface plane En da N/m ²
	Nœuds	m/s	Km/h		
0	1	0/0.4	<1	Calme	
1	1/3	0.5/1.5	1/5	Très légère brise	0.13 (1 m/s)
2	4/6	1.6/3.4	6/11	Légère brise	0.8 (2.5 m/s)
3	7/10	3.5/5.5	12/19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	11/16	5.5/8	20/28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
5	10/21	8.1/10.9	29/38	Bonne brise	13 (10 m/s)
6	22/27	11.4/13.9	39/49	Vent frais	22 (13 m/s)
7	28/33	14.1/16.9	50/61	Grand frais	33 (16 m/s)
8	34/40	17.4/20.4	62/74	Coupe vent	52 (20 m/s)
9	41/47	20.5/23.9	75/88	Fort coup de vent	69 (23 m/s)
10	48/55	24.4/28	89/102	Tempête	95 (27 m/s)
11	56/63	28.4/32.5	103/117	Violent tempête	117 (30 m/s)
12	64/71	32/35.9	118/133	Ouragan	160 (35 m/s)
13	72/80	36.9/40.4	134/149		208 (40 m/s)
14	81/89	40.1/45.4	150/166		265 (45 m/s)
15	90/99	45.1/50	167/183		325 (50 m/s)
16	100/108	50.1/54	184/201		365 (54 m/s)
17	109/118	54.1/60	202/222	Cyclone	470 (60 m/s)

Tableau I.1 :l'échelle beaufort [4]

I.11 Energie éolienne en Algérie

L'Algérie dispose d'un potentiel éolien considérable qui peut d'être exploiter pour la production de l'énergie électrique, surtout dans le sud (Sahara) où les vitesses du vent sont nettement plus élevées que celles du nord, et plus précisément dans le sud-ouest où les vitesses dépassent 4 m/s [13].

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie, [14].

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes, [14]:

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

I.11.1 Gisement éolien en Algérie

Par sa situation, l'Algérie possède un gisement éolien important, principalement sur une bande côtière d'une centaine de kilomètres de largeur.

De plus, en se plaçant vers l'intérieur du pays on trouve un gisement intérieur aux hauts plateaux aussi élevé que sur les rivages et à une hauteur bien moindre. En se déplaçant encore d'avantage vers l'intérieur, au Sahara, on rencontre les gisements les plus intéressants en Algérie [4].

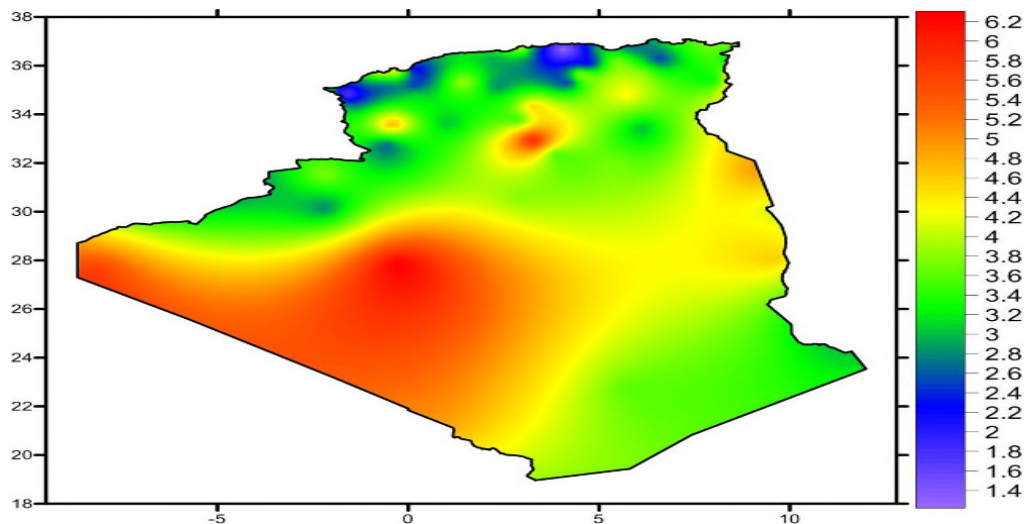


Figure I.8 : gisement éolien en Algérie[4]

I.11.2 Projet à faire en l'Algérie

Sonelgaz a mis en service sa première ferme éolienne d'Adrar d'une capacité de 10 Mégawatts qui servira aussi de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420MW à l'horizon 2024. Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune (pour une capacité globale de 10 Mégawatts), cette ferme est implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertene à 72km au nord de la wilaya d'Adrar, a nécessité près de 32 mois de travaux pour un coût global de 2,8 milliards de dinars [13].



Figure I.9 : Première ferme éolienne en Algérie

I.12 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolien

L'énergie éolien a des avantages permettant son évolution, ce qui va lui donnée un rôle important, cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut éviter.

I.12.1 Avantages [6]

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

- L'énergie éolienne à permet d'éviter le réchauffement climatique, des pluies acides et la pollution de notre planète en général ;
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées ;
- Contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire ;
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie ;
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables ;
- Le coût d'investissement nécessaire d'un parc éolien est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles ;
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours.

I.12.2 Inconvénients

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

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif ;
- Le bruit, notamment le bruit aérodynamique (les pales) et celle -ci doit donc être limité ;

- Les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux ;
- La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne ;
- l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs sur le réseau ;
- Le coût de l'énergie éolienne sur les sites moins ventés reste encore plus élevé que celui des sources classiques.

I.13 L'aérogénérateur

L'aérogénérateur est un dispositif qui capte l'énergie cinétique du vent et la transforme en énergie mécanique à l'aide des pales puis en énergie électrique à l'aide d'une génératrice. Tout d'abord, le vent actionne les pales. Ce mouvement est transmis à l'arbre principal lié par un multiplicateur à l'arbre secondaire afin d'augmenter le nombre de tours. Ensuite, la génératrice transforme cette énergie mécanique en une énergie électrique qui sera conduite vers le réseau électrique [7].

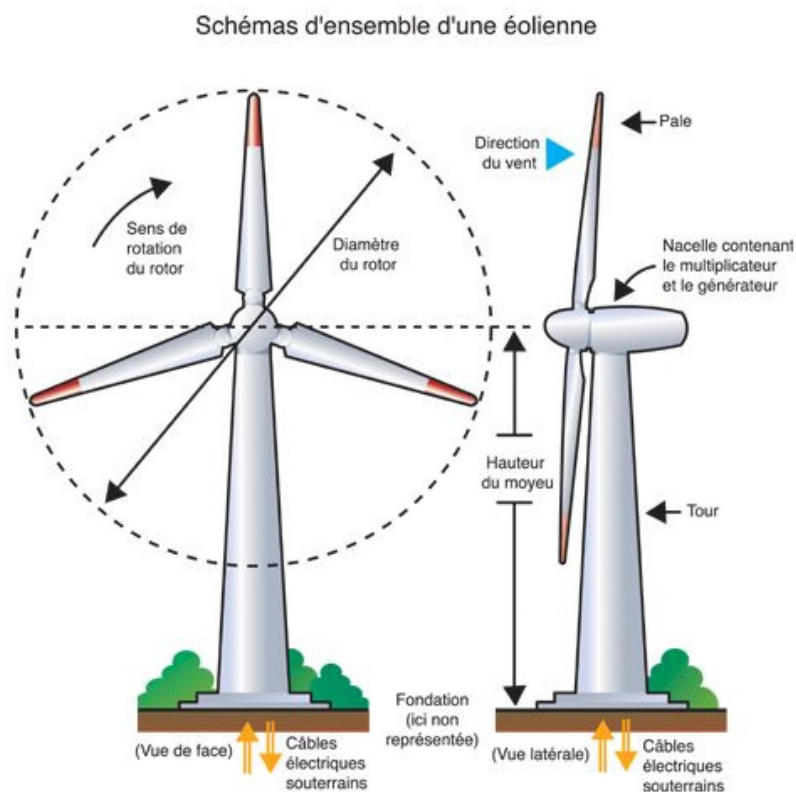


Figure I.10 : schéma de fonctionnement d'un éolien [7]

I.14 Les composants d'une éolienne [8]

L'aérogénérateur est constitué par une tour qui est l'élément porteur, et à sa sommet se trouvent fixés la nacelle et l'ensemble rotor-pales qui sont les éléments actifs.

La figure I.6 représente les différents composants d'une éolienne.

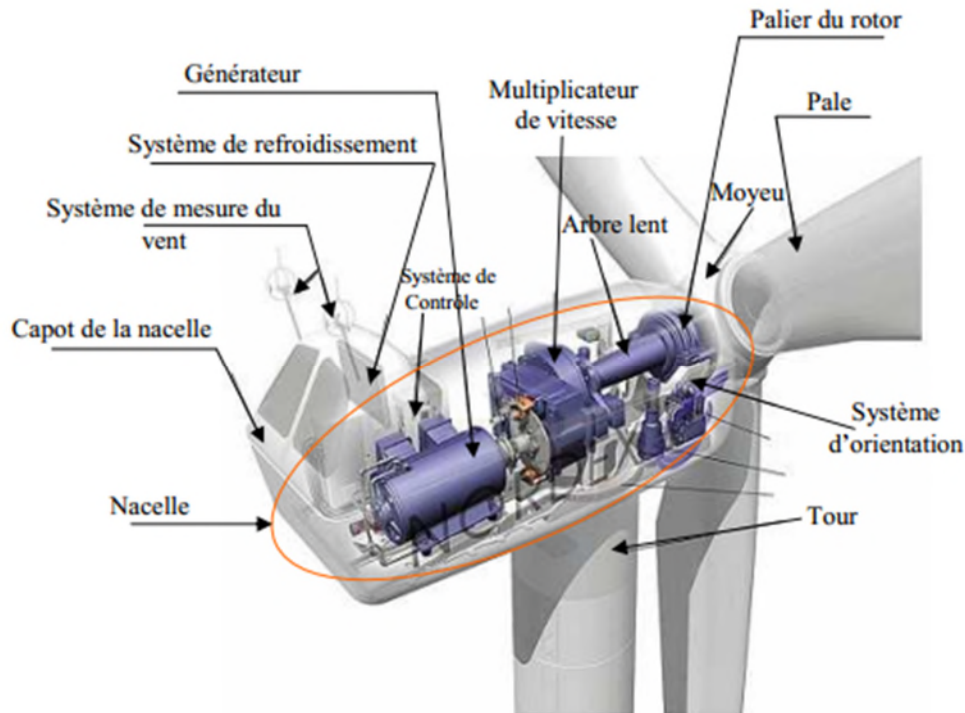


Figure I.11 : les composants d'une éolienne

I.14.1 La tour

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou un treillis métallique, il doit être le haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La tour a une forme conique ; à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les Éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle.

I.14.2 La nacelle

Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique et divers actionneurs de commande. Les parties essentielles constituant la nacelle sont comme suit :

➤ **Arbre lent**

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

➤ **Multiplicateur de vitesse**

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne.

➤ **Le système de refroidissement**

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe certains types d'éoliennes comportant un refroidisseur à l'eau.

➤ La génératrice

La génératrice constitue l'élément assurant la conversion d'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de différents types de machines (généralement asynchrones).

➤ Anémomètre

C'est un dispositif de mesure de la vitesse du vent ; ayant la possibilité d'émettre des signaux électriques qui seront utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne afin de la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même le système de commande électrique assure la protection de l'éolienne en provoquant un arrêt automatique si la vitesse du vent dépasse 25m/s.

➤ Le système de contrôle-commande

Il permet un contrôle du dispositif éolien. En cas de danger, à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne.

➤ Le système d'orientation de la nacelle

Le système d'orientation de la nacelle est constitué d'une couronne dentée (crémaillère) équipée d'un moteur. Il permet d'orienter l'éolienne et de bloquer sa position, grâce à un frein, dans l'axe du vent [15].

I.14.3 Le rotor et les pales

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont-elles mêmes menées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59 % (limite de Betz).

La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profit aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée en matériau suffisamment résistant à la force de pression exercée par le vent. Pour cela, les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante. Pour une meilleure efficacité énergétique, les pales s'affinent vers l'extrémité et sont variées dans leur longueur [8].

I.14.4 Le moyeu

C'est le support des pales. Il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure [8].

I.15 Types des éoliennes

L'éolien se divise en deux catégories : le modèle horizontal et le modèle verticale

I.15.1 Aérogénérateur à axe horizontal

Ce type d'aérogénérateur est le plus répandu dans l'industrie des éoliennes à cause du positionnement du capteur éolien à quelques dizaines de mètres au dessus du sol, ce qui réduit les contraintes mécaniques et augmente l'efficacité.

Les aérogénérateurs à axe horizontale utilisés généralement pour la production de l'énergie électrique sont à trois pales, mais il existe d'autres structures à une ou deux pales [9].



Figure I.12 : éolienne à axe horizontal

➤ **Les avantages des éoliens à axe horizontal**

- présentent un rendement aérodynamique plus élevé ;
- Elles présentent un faible encombrement au niveau du sol ;
- Elles démarrent de façon autonome ;
- Elles représentent un coût moins important que celles à axe vertical ;
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.

➤ **Les inconvénients des éoliens à axe horizontal**

- Elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales ;
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident ;
- L'installation est bruyante.

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 [2].

I.15.2 Aérogénérateur à axe vertical

Ce type représente la première structure des aérogénérateurs. L'adjectif vertical signifie que son arbre est vertical au sol, plusieurs structures ont vu le jour mais seulement deux structures ont été industrialisées [9] :

➤ **Structure Savonius**

basé sur le principe de la "traînée différentielle " qui illustre que le mouvement de rotation est dû au fait que l'air en mouvement exerce des pressions différents corps constituant l'éolienne, et que la force du vent agissant sur la partie concave est très différente de la force s'exerçant sur la partie convexe, créant ainsi un couple moteur sur l'axe [9].

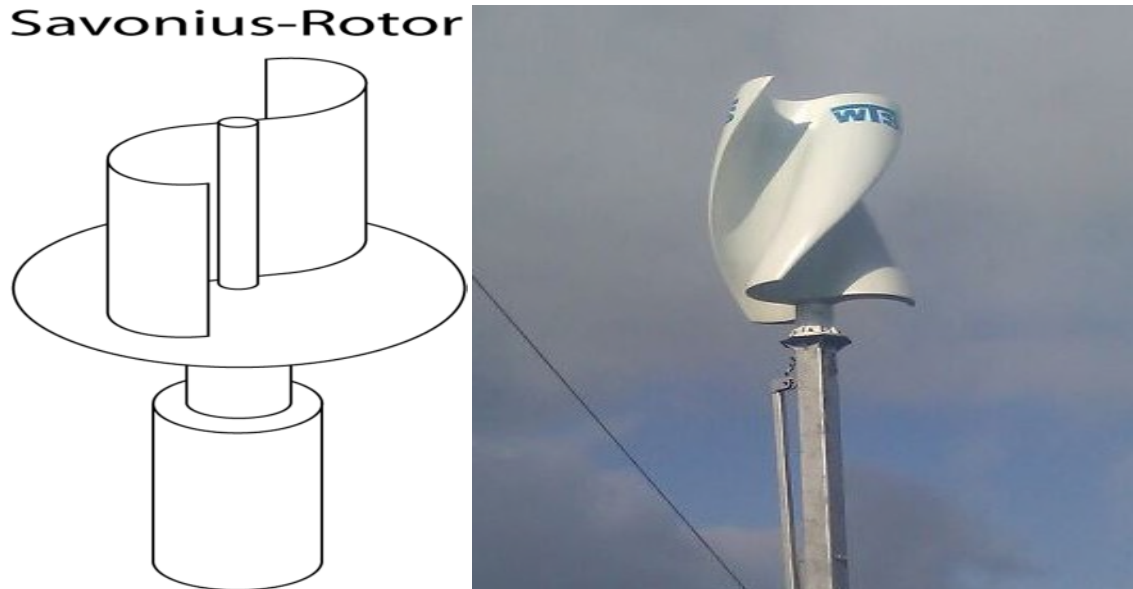


Figure I.13 : structure de savonius

➤ **Structure Darrieus**

Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif [9].

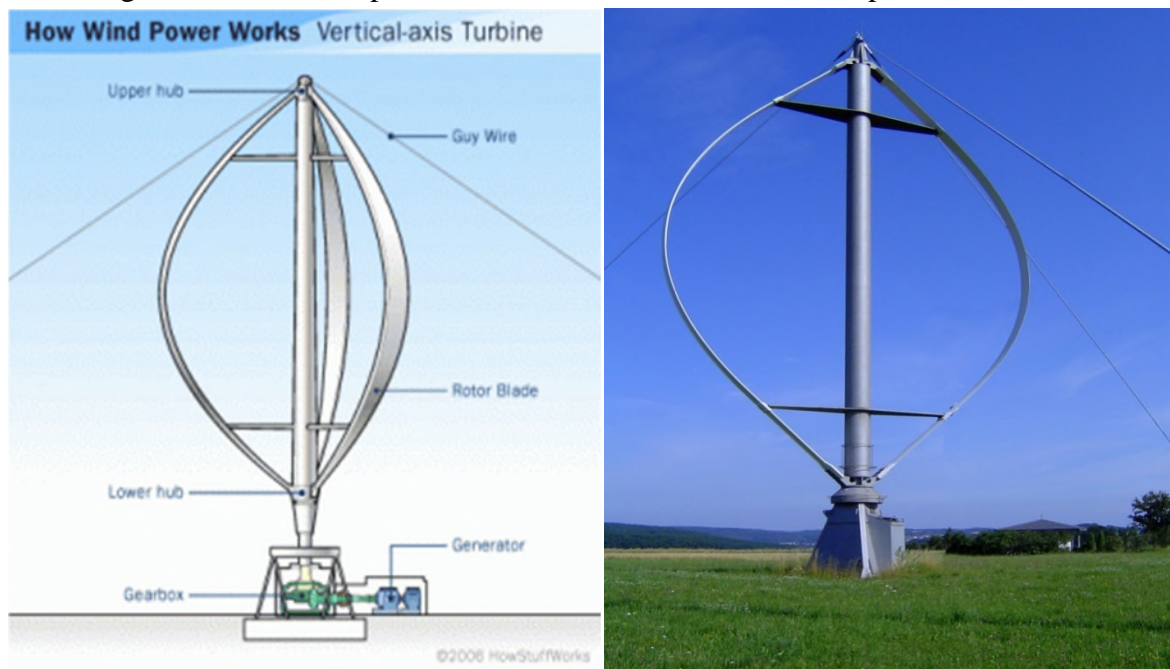


Figure I.14 : structure darrieus

➤ **Les avantages et les inconvénients des éoliens à axe vertical**

Les aérogénérateurs à axe vertical ont l'avantage d'avoir la génératrice et les organes de commande au niveau du sol ce qui facilite les interventions de la maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'installer un système d'orientation des pales mais la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Ils sont de plus exposés à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [9].

I.16 Technologies de fonctionnement des systèmes éoliens

I.16.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est réglée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques.

Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif).

Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1% [15].

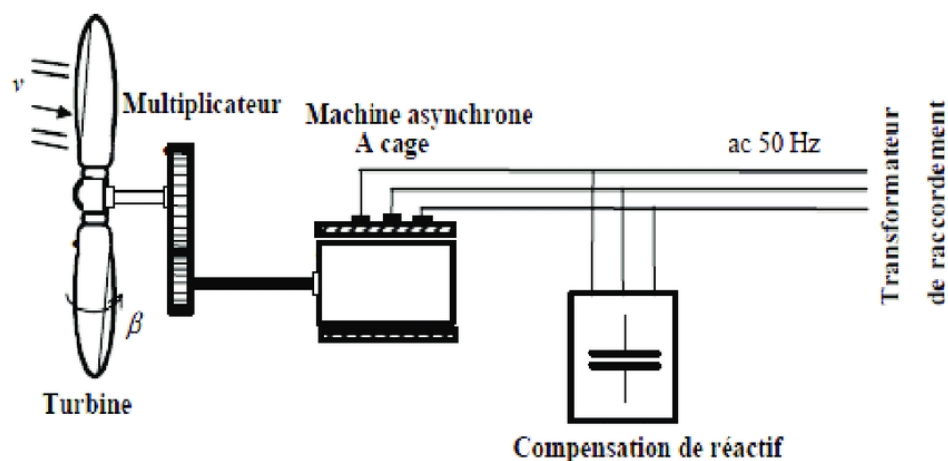


Figure I.15 : Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage [9].

➤ **Avantage du fonctionnement à vitesse fixe**

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont : [9]

- Structure simple ;
- Absence des convertisseurs de puissance ;
- Moins cher.

➤ Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

Cette stratégie pose beaucoup de problèmes au niveau de l'exploitation de l'énergie extraite : [9]

- Puissance extraite non optimisée (On rate les maxima théoriques) ;
- Rendement très faible pour les moyens et faibles vents ;
- Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse ;
- Perte de control de la puissance réactive ;
- Magnétisation de la génératrice non contrôlée.

I.16.2 Fonctionnement à vitesse variable

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [15].

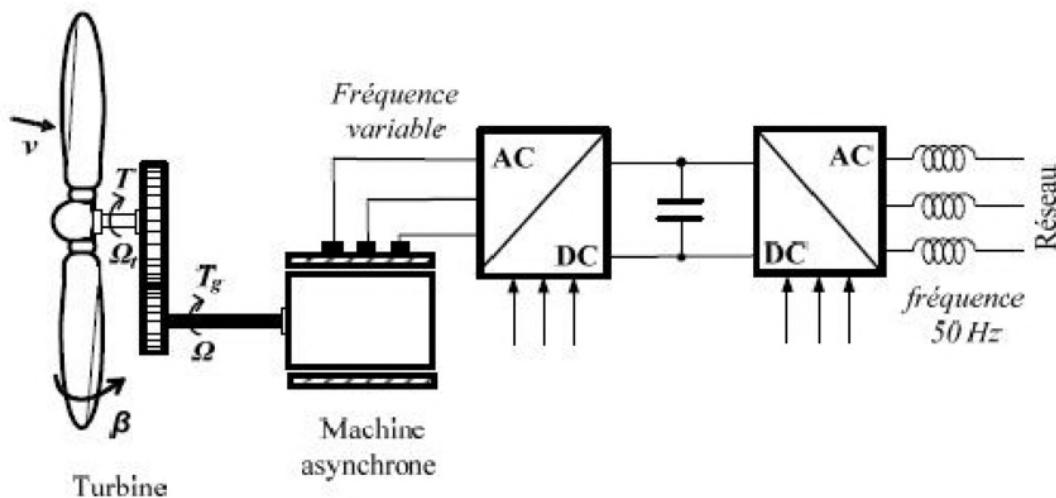


Figure I.16 : Eolienne à vitesse variable à base de la machine asynchrone à cage [9]

Les avantages de cette configuration sont les suivants [15] :

- Augmentation du rendement énergétique;
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance;
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient [15].

I.17 Différentes machines utilisées par les systèmes éoliens

La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éoliennes. Différents types de machines électriques peuvent être utilisées pour la génération de la puissance électrique.

Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW le générateur asynchrone est plus courant et économique [2].

Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes à vitesse variable sont : la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), la génératrice asynchrone à cage (GAS), la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), ainsi que la génératrice à double étoile (GASDE) [2].

I.17.1 Système éolienne à base d'une génératrice synchrone

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Néanmoins, les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobine demandent un entretien régulier de système bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive (figure I.12) [16].

Les machines synchrones à aimants permanents sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables (figure 1.2).

Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défaut : suppression du multiplicateur mécanique de vitesse et du système bagues et balais pour les GSAP. La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [16].

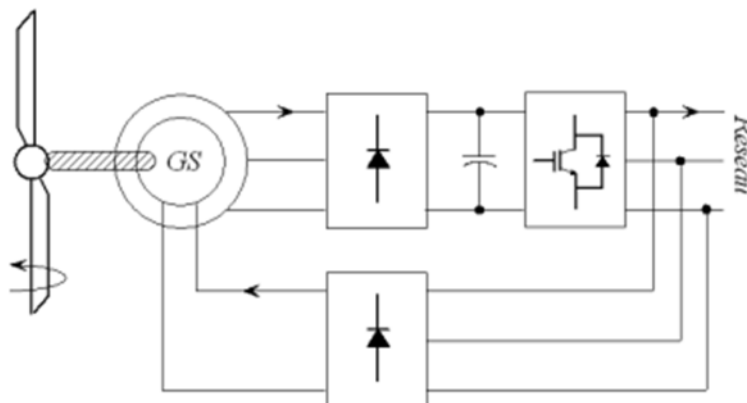


Figure I.17 : éolien basé sur la machine synchrone [16]

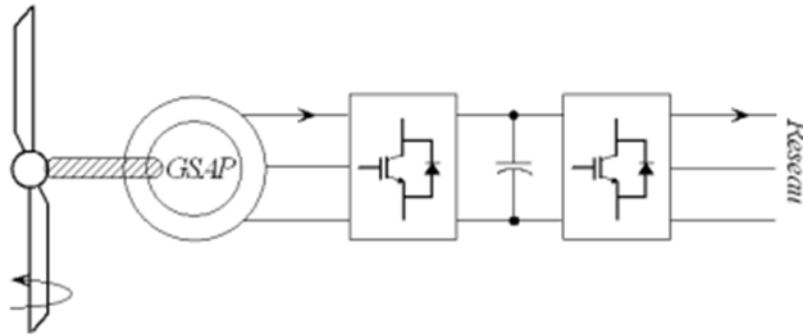


Figure I.18 : éolien basé sur la machine synchrone à aimant permanent [16]

➤ Avantages

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.
- Contrôle de l'éolienne à travers le convertisseur connecté à ce réseau.
- Elle est utilisée en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique).

➤ Inconvénients

- Grand diamètre de machine.
- Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.
- L'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation.

I.17.2 Système éolienne à base d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien. Une topologie consiste à relier la MAS à cage d'écureuil au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs statique, un multiplicateur est associé à la machine. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité [2].

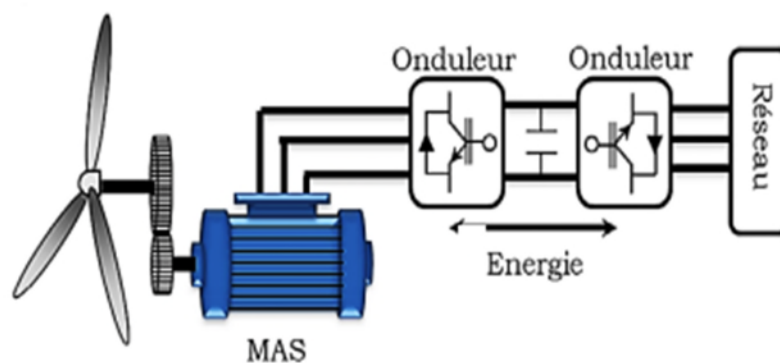


Figure I.19 : éolien basé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil [2]

➤ **Avantages**

- Fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances.
- Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien.
- Elle possède une très grande fiabilité et robustesse.

➤ **Inconvénients**

- La puissance extraite est non optimisée.
- La magnétisation de la machine est imposée par le réseau.
- Il n'y a pas de contrôle de l'énergie réactive.
- Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.

I.17.3 Système éolien à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation

I.17.3.1 Structure à énergie rotorique dissipée [8]

Avec les génératrices synchrones ; la MADA présente actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne.

Ces machines sont un peu complexes que celles à cage ; avec lesquelles ; elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse.

La figure I-15 montre la technologie de Vestas qui permet une variation limitée de la vitesse de rotation à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance rotor. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de ce montage est la dissipation de la puissance rotor dans les éléments résistifs.

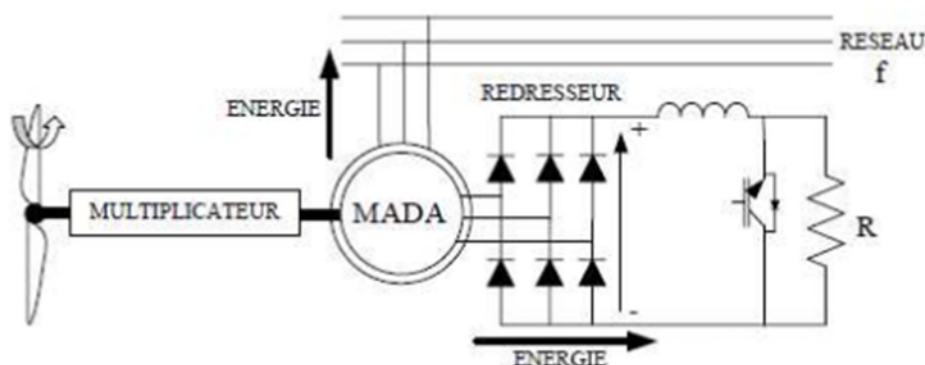


Figure I.20 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation, régulation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor [8].

I.17.3.2 Structure à rotor bobiné [8]

Une autre solution très intéressante et permettant l'obtention d'une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme. Cela consiste à coupler le rotor de la MADA au réseau à travers deux convertisseurs MLI triphasés. En général ; le dimensionnement de la chaîne rotor se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine, ce qui assure la variation sur 30% de la plage de vitesse. C'est là son principal avantage ; tandis que son inconvénient majeur réside dans la présence de bagues collectrices. Ces contacts s'usent rapidement et demandent un entretien.

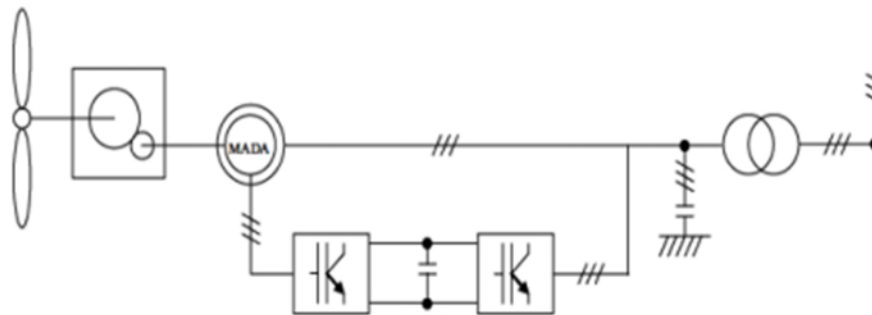


Figure I.21 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation, régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation [8].

➤ **Avantages**

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.
- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale.
- Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ de vitesse nominale).

➤ **Inconvénients**

- Maintenance du multiplicateur.
- Commande complexe.
- Faible robustesse.

I.17.4 Système éolienne à base d'une génératrice à double étoile

La génératrice asynchrone double étoile (GASDE) comme la génératrice asynchrone à cage (GAS), si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, elle se développe alors une force électromagnétique similaire à celle qui obtenue avec un générateur synchrone, la machine n'engendre pas sa propre énergie d'excitation. Pour cela, il faudra lui apporter cette énergie et stabiliser sa tension de sortie et sa fréquence à travers des condensateurs connectés à la borne du stator [2].

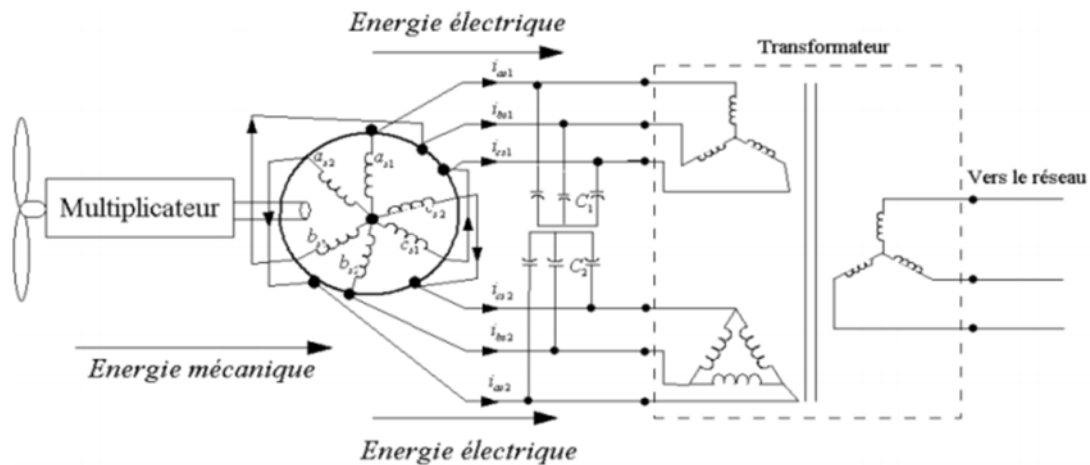


Figure I.22 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à double étoile [17]

➤ Avantages

- Segmentation de puissance.
- Amélioration de la robustesse.
- Amélioration du facteur de puissance.
- Réduction des courants harmoniques.
- Réduction de différentes pertes.
- Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.
- Assure la continuité de service en cas de défaut au niveau d'un stator (fonctionnement régime dégradé).

➤ Inconvénients

- L'inconvénient majeur est l'apparition de courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension.
- Le nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases, ce qui peut éventuellement augmenter le coût de l'ensemble convertisseur machine.
- La présence du multiplicateur.

I.18 Stockage de l'énergie éolienne [18]

Physiquement, l'électricité peut être stockée directement dans des condensateurs et dans des inductances. Cependant, même avec les super-condensateurs ou avec les inductances *supraconductrices* (SMES : Super conductor Magnetic Energy Storage), les quantités d'énergie qu'il est possible de confiner avec ces composants sont faibles.

Le stockage de l'électricité peut se faire d'une façon significative. Il faut d'abord la transformer en une autre forme d'énergie stockable, puis effectuer la transformation inverse lorsqu'on désire disposer à nouveau de l'électricité.

Les possibilités techniques sont très vastes et concernent pratiquement toutes les formes d'énergie : mécanique, chimique ou thermique.

Un classement des techniques de stockage peut se faire, selon leur nature d'applications, en 2 catégories :

I.18.1 Techniques de stockage à grande échelle

➤ Le stockage hydraulique

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

➤ 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).

➤ Stockage sous forme d'énergie de pression (air comprimé)

Une centrale de production d'électricité avec une turbine du gaz classique utilise près de deux tiers de la puissance disponible sur l'arbre pour la compression de l'air de combustion. Cet air peut être stocké souterrain et bénéficier de pression géostatique.

I.18.2 Technique de stockage à moyenne et faible échelles

Dont les usages peuvent également servir le réseau, mais aussi la production décentralisée pour de nombreuses applications. Ces techniques comprennent le stockage : sous forme mécanique (volants d'inertie), sous forme électrochimique (accumulateurs et super condensateurs), sous forme magnétique, ou sous forme d'air comprimé ou d'hydrogène (piles à combustible) [18] [3].

➤ Le 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.

➤ Le 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.

➤ Le 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.19 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu sur l'énergie renouvelable et puis, on a intéressé beaucoup plus à l'énergie éolienne et son exploitation pour la production de l'énergie électrique et son importance en tant qu'énergie vert.

Après un rappel sur les différents types d'éoliennes et les technologies de fonctionnement des systèmes éoliennes.

Finalement nous avons discuté sur différents machines utilisé par les systèmes éoliennes.

Notre travail porte sur système éolienne utilisant une machine asynchrone à double étoile (MASDE).le prochaine chapitre sera donc consacré à l'étude de cette dernière (modélisation et simulation).

Chapitre II

***Modélisation et
simulation de la
machine asynchrone à double étoile***

II. Modélisation et simulation de la machine asynchrone à double étoile

II.1 Introduction

La modélisation de la machine électrique fait appel à des équations en général très complexes. En effet, la répartition des enroulements et la géométrie propre de la MASDE rendent son modèle difficile à mettre en œuvre. Cependant, l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices permet de contourner cette difficulté. Après la description et la modélisation de la machine basée sur la théorie unifiée des machines électriques classiques, dites encore théorie généralisée, cette dernière est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement (direct et en quadrature) [16].

Dans ce chapitre on modélise dans un premier temps la machine asynchrone à double étoile MASDE. Ensuite nous passerons à l'association de cette dernière (MASDE) aux onduleurs de tensions à commande MLI, l'étude sera menée avec un décalage angulaire $\alpha = 30^\circ$

Finalement, des résultats de simulations seront présentés et commentés

II.2 Description de la machine asynchrone double étoile

Le modèle de 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. Pour simplifier l'étude, nous considérons que les circuits électriques du rotor sont équivalents à un enroulement triphasé en court-circuit [16] [13].

Les grandeurs relatives aux deux étoiles seront notées respectivement par les 'indices 1 et 2

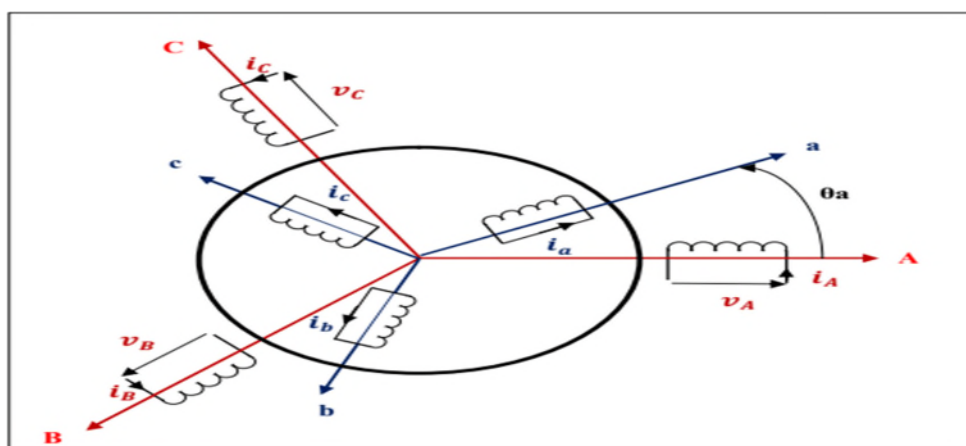


Figure II-1 : Représentation schématique des enroulements de la MASDE [20]

II.3 Hypothèses simplificatrices

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- Le circuit magnétique est non saturé ;
- La machine est de constitution symétrique ;
- Force magnétomotrice à répartition spatiale sinusoïdale ;
- les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé (effet pelliculaire) ;
- Les pertes par hystérésis et par courant de Foucault sont négligées.

II.4 Modèle de la machine asynchrone à double étoile

II.4.1 Les équations électriques

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

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

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

$$\text{Pour le rotor : } \begin{cases} V_{ar} = R_r I_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} = 0 \\ V_{br} = R_r I_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} = 0 \\ V_{cr} = R_r I_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

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 ;

$[V_r]$: Matrice de tension de rotor.

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

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

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

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

$$[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix}; [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}.$$

$[R_{s1}]$: Matrice des résistances de l'étoile 1;

$[R_{s2}]$: Matrice des résistances de l'étoile 2;

$[R_r]$: Matrice des résistances de rotor.

Avec :

R_{s1} : Résistance d'une phase de l'étoile 1 ;

R_{s2} : Résistance d'une phase de l'étoile 2 ;

R_r : Résistance d'une phase de rotor.

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

$[\varphi_{s1}]$: 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 Equations magnétiques

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

$$\begin{bmatrix} \varphi_{s1} \\ \varphi_{s2} \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

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

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

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

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

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

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

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.4.3 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.

$$C_{em} = \frac{\partial W}{\partial \theta} = \frac{\partial W}{\partial \theta_{geo}} p \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$W = \frac{1}{2} ([i_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [i_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [i_r]^t [\varphi_r]) \quad (\text{II.6})$$

Le couple électromagnétique est donné par l'expression(II.5)

$$C_{em} = \frac{p}{2} ([i_{s1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1r}] [I_r]^t + [i_{s2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2r}] [i_r]^t) \quad (\text{II.7})$$

II.4.4 Equation mécanique

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

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} + K_f \Omega_r \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{p} ; \quad (\text{II.9})$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}. \quad (\text{II.10})$$

C_{em} : Couple électromagnétique de la machine ;

C_r : Couple résistant ;

Ω_r : vitesse angulaire mécanique du rotor ;

ω_r : vitesse angulaire électrique de rotation du rotor ;

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.5 Modèle biphasé de la MASDE

II.5.1 Transformation de park

La modélisation de la MASDE dans le repère (d,q), passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales, pour cela, on applique les matrices de passage de Park direct et inverse suivantes :

La figure (II.2) représente la transformation du système triphasé en un système biphasé tournant.

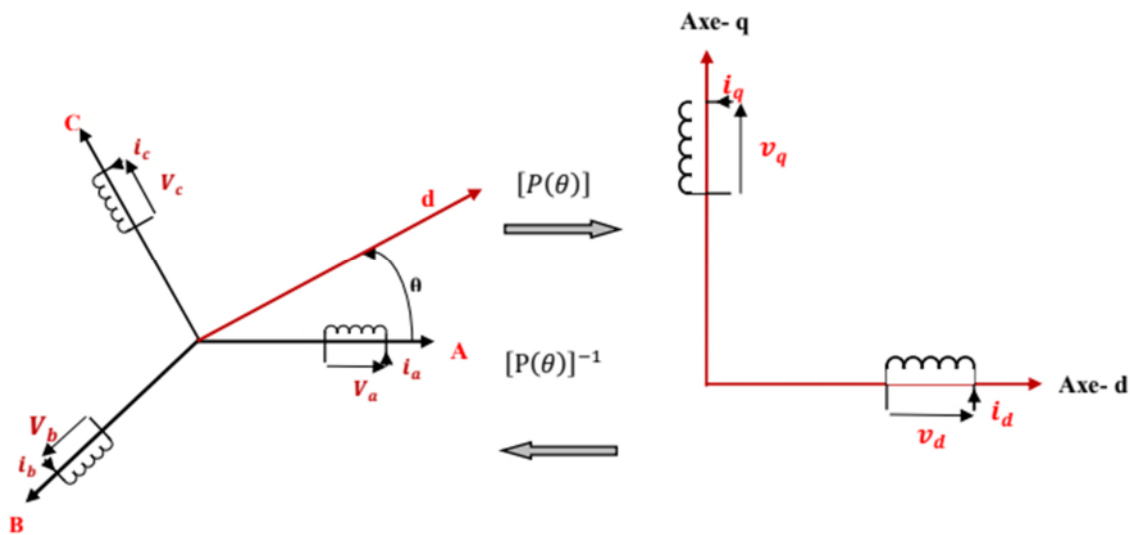


Figure II-2 : passage du système abc au système dqo [20]

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

$$[P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

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

$$[P(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

La matrice de Park pour le rotor est définie comme suit :

$$[P(\theta_{gl})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

II.5.2 Choix du référentiel

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

II.5.2.1 Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, on a :

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

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

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.5.2.2 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.5.2.3 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.5.3 Equations électriques et magnétiques

En appliquant la transformation de Park aux équations électriques et magnétiques de la machine on aura le système d'équations suivant [19] :

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + \frac{d}{dt}\phi_{ds1} - \omega_s\phi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + \frac{d}{dt}\phi_{qs1} + \omega_s\phi_{ds1} \\ v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d}{dt}\phi_{ds2} - \omega_s\phi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d}{dt}\phi_{qs2} + \omega_s\phi_{ds2} \\ v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\phi_{dr} - \omega_{gl}\phi_{qr} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\phi_{qr} + \omega_{gl}\phi_{dr} \end{cases} \quad (II.14)$$

Où :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r . \quad (II.15)$$

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

$$\begin{cases} \phi_{ds1} = L_{s1}i_{ds1} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{qs1} = L_{s1}i_{qs1} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \phi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (II.16)$$

II.5.4 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 :

$$P_a = v_{ds1}i_{ds1} + v_{qs1}i_{qs1} + v_{ds2}i_{ds2} + v_{qs2}i_{qs2} \quad (II.17)$$

En remplaçant les tensions ($v_{ds1}, v_{qs1}, v_{ds2}$ et v_{qs2}) par leurs expressions dans l'équation (II.20), on trouve :

$$P_a = (R_{s1}i_{ds1}^2 + R_{s1}i_{qs1}^2 + R_{s2}i_{ds2}^2 + R_{s2}i_{qs2}^2) + \left(\frac{d\varphi_{ds1}}{dt} i_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} i_{qs2} \right) + \omega_s (\varphi_{ds1} i_{ds1} - \varphi_{qs1} i_{qs1} + \varphi_{ds2} i_{ds2} - \varphi_{qs2} i_{qs2}) \quad (\text{II.18})$$

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}).

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = p \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (\text{II.19})$$

L'expression du couple électromagnétique est exprimée alors par :

$$C_{em} = p (\varphi_{ds1} i_{ds1} - \varphi_{qs1} i_{qs1} + \varphi_{ds2} i_{ds2} - \varphi_{qs2} i_{qs2}) \quad (\text{II.20})$$

En remplaçant les flux ($\varphi_{ds1}, \varphi_{qs1}, \varphi_{ds2}, \varphi_{qs2}$) donnés par (II.16) dans (II.20), on obtient l'équation (II.21):

$$C_{em} = p L_m [(i_{qs1} + i_{qs2}) i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2}) i_{qr}] \quad (\text{II.21})$$

A partir des équations des flux rotorique (φ_{dr} et φ_{qr}) exprimées par (II.16), on tire les expressions :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{dr} - L_m (i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (\text{II.22})$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{qr} - L_m (i_{qs1} + i_{qs2})] \quad (\text{II.23})$$

En introduisant les expressions des courants (i_{dr}, i_{qr}) dans l'expression du couple électromagnétique (II.21), on obtient :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{qs1} + i_{qs2}) \varphi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2}) \varphi_{qr}] \quad (\text{II.24})$$

II.5.5 Représentation d'état de la MASDE

En introduisant le système d'équations (II.16) dans (II.14) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

$$[B][U] = [L][i] + \omega_{gl}[C][I] + [D][I] \quad (\text{II.25})$$

Où :

$[U] = [v_{ds1} v_{ds2} v_{qs1} v_{qs2} v_{dr} v_{qr}]^t$: Vecteur de commande.

$[I] = [i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}, i_{dr}, i_{qr}]^t$: Vecteur d'état et $[i] = \frac{d}{dt} [I]$.

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

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

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

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

En mettant le système (II.28) sous forme d'état, on trouve :

$$[i] = [L]^{-1}([B] [U] - \omega_{g1}[C] [I] - [D] [I]) \quad (II.26)$$

II.6 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande MLI

II.6.1 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 [16] [19].

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 :

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

Avec

$$f_i + \bar{f}_i = 1 \\ i = 1 \dots 3$$

La figure (II.3) représente le schéma de l'onduleur triphasé.

Les tensions composées sont :

$$\begin{cases} V_{AB} = v_{as1} - v_{bs1} = E(f_1 - f_2) \\ V_{BC} = v_{bs1} - v_{cs1} = E(f_2 - f_3) \\ V_{CA} = v_{cs1} - v_{as1} = E(f_3 - f_1) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

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

$$v_{as1} + v_{bs1} + v_{cs1} = 0 \quad (\text{II.28})$$

La résolution des équations (II.27) et (II.28) donne :

$$\begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Pour le second onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

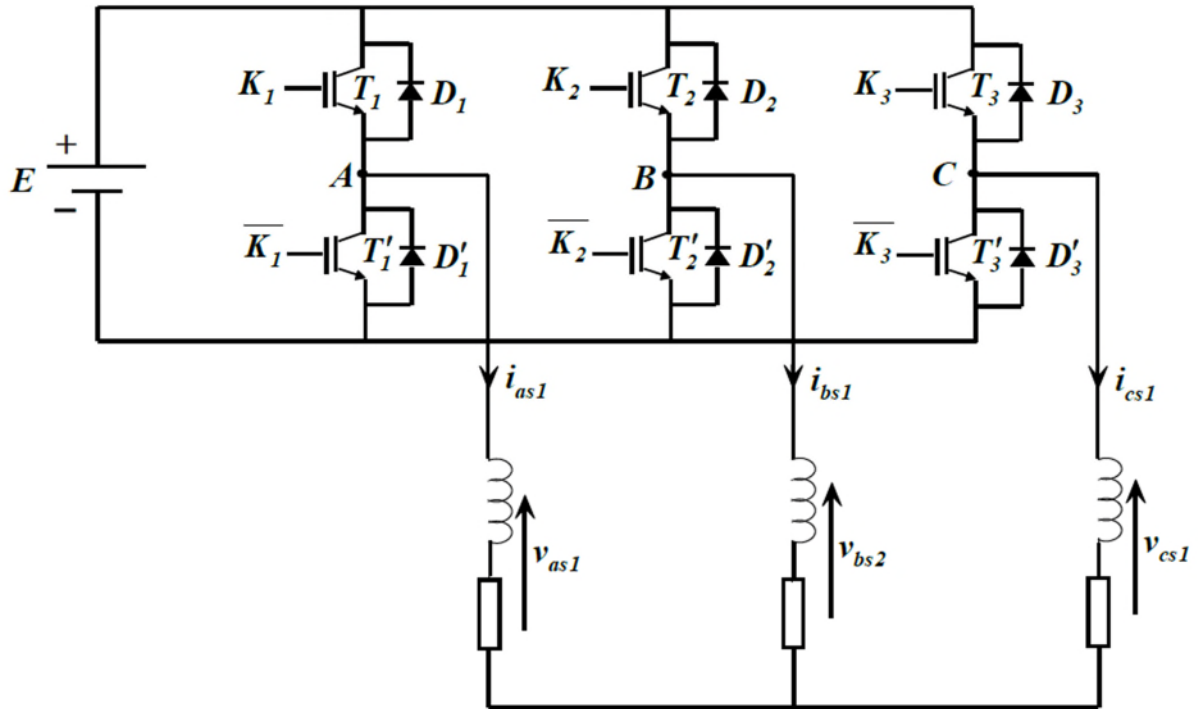


Figure II-3 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé [16]

II.6.2 Commande par modulation 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 :

$$\begin{cases} v_{a1}^* = v_m \sin(2\pi ft) \\ v_{b1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Pour la seconde étoile,

$$\begin{cases} v_{a2}^* = v_m \sin(2\pi ft - \alpha) \\ v_{b2}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c2}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$v_p(t) = \begin{cases} v_{pm} \left[4 \left(\frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ v_{pm} \left[-4 \left(\frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

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) :

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}).

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

II.6.3 Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

La figure (II.4) représente l'association de la MASDE-convertisseurs de tensions à commande MLI sinus-triangle.

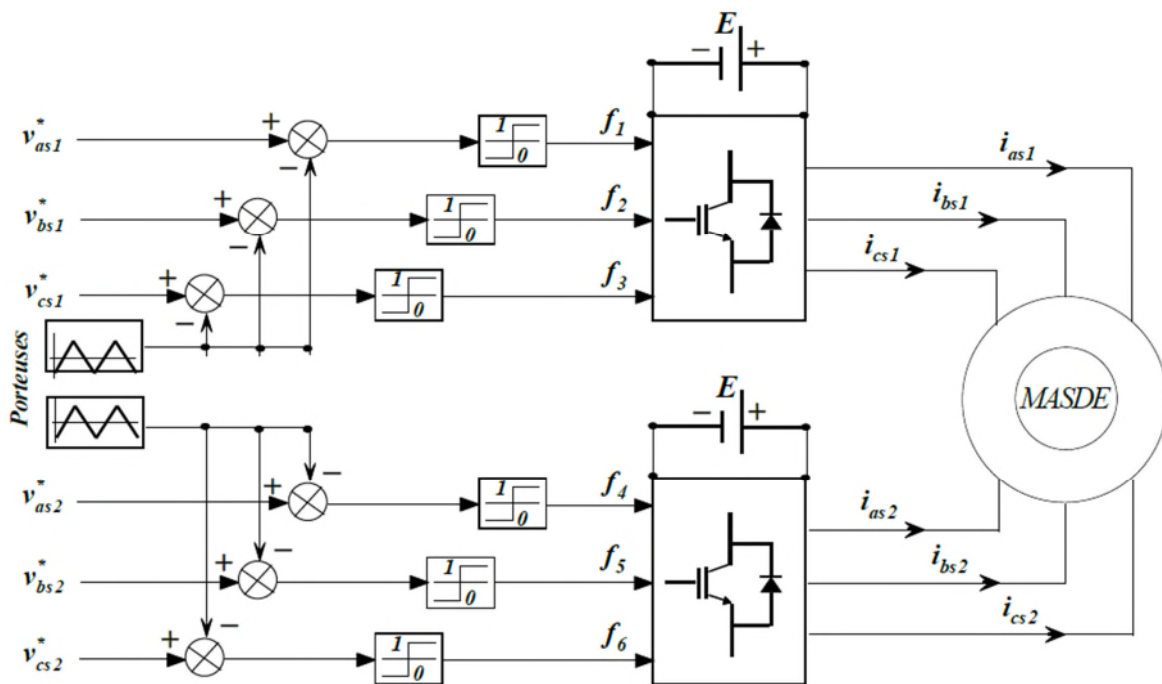


Figure II-4 : association MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

II.7 Simulation et interpretation des resultats

Pour la simulation, on a implanté le modèle électrique de la MASDE sous l'environnement Matlab/Simulink®, la structure en schéma bloc de cette simulation est présentée par la figure (II.5). La simulation est effectuée avec un décalage angulaire $\alpha_e = 30^\circ$.

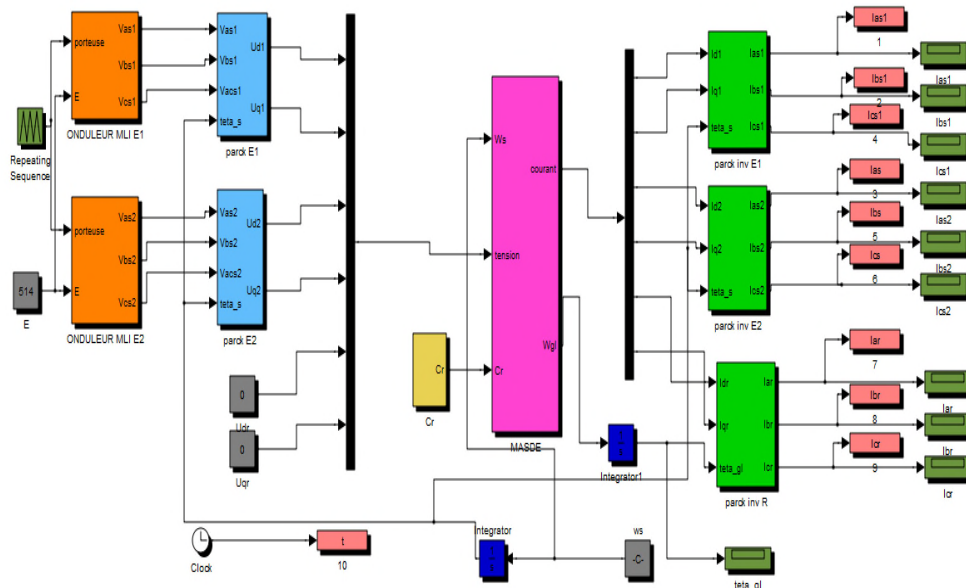
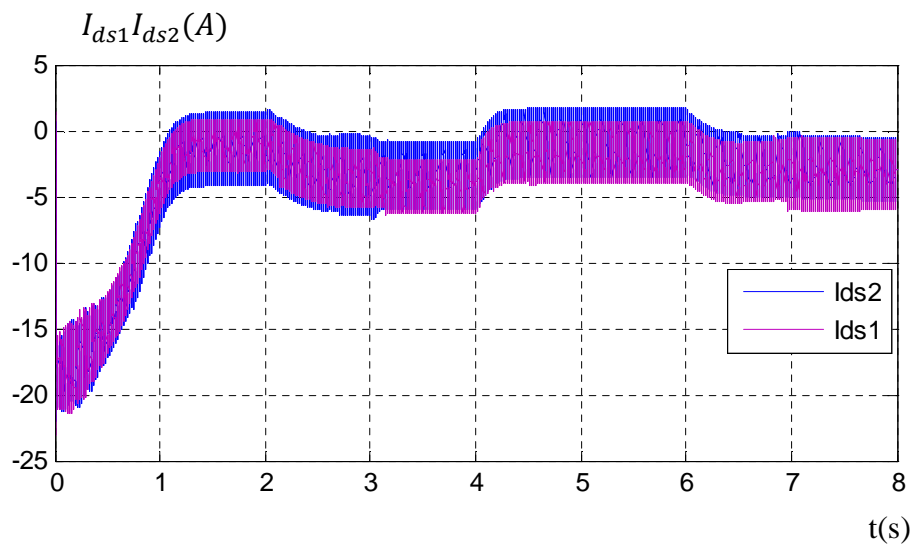
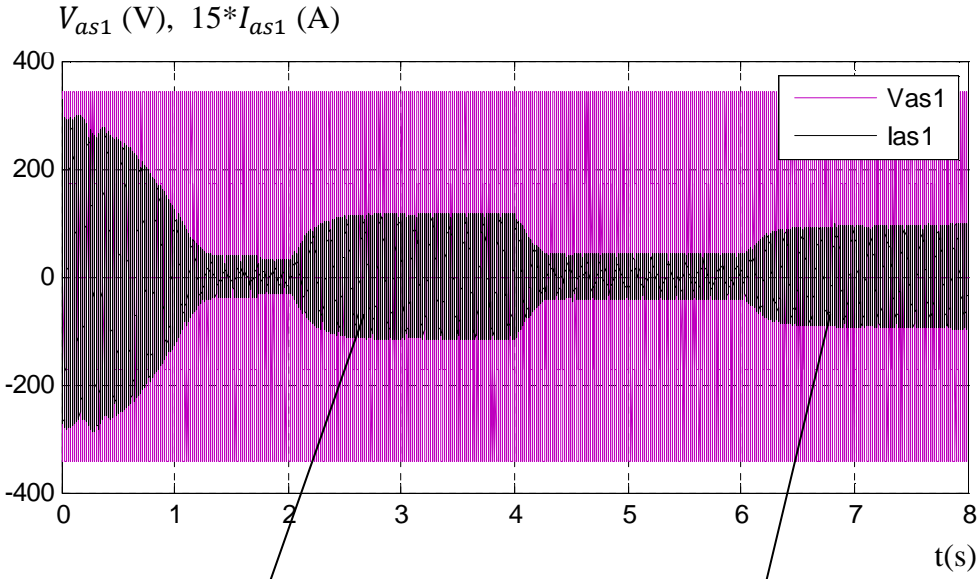


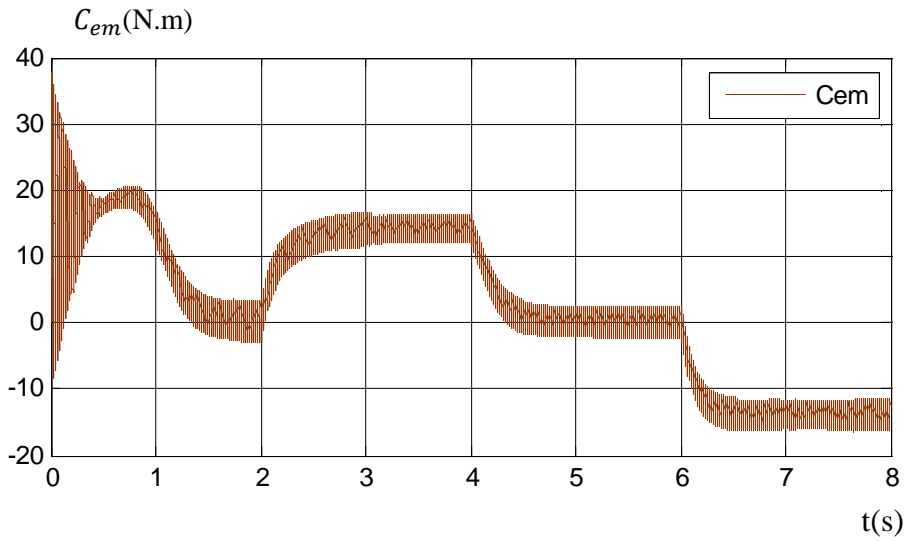
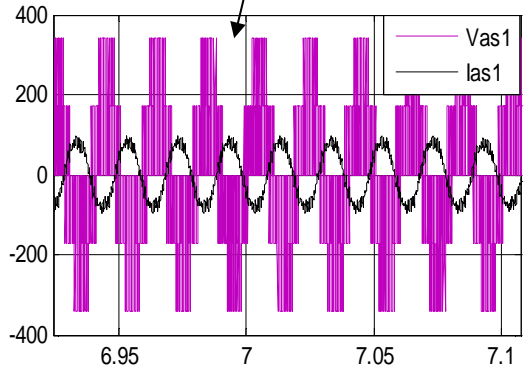
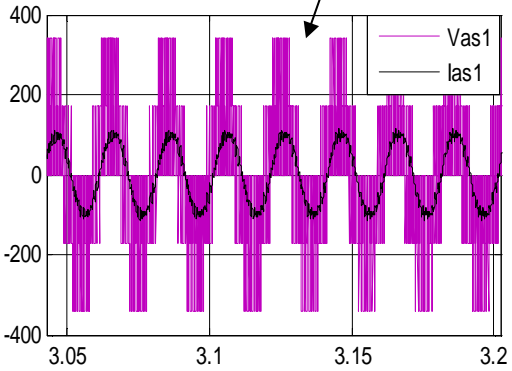
Figure II-5 : schéma bloc global de simulation de la MASDE alimentée par deux onduleurs MLI



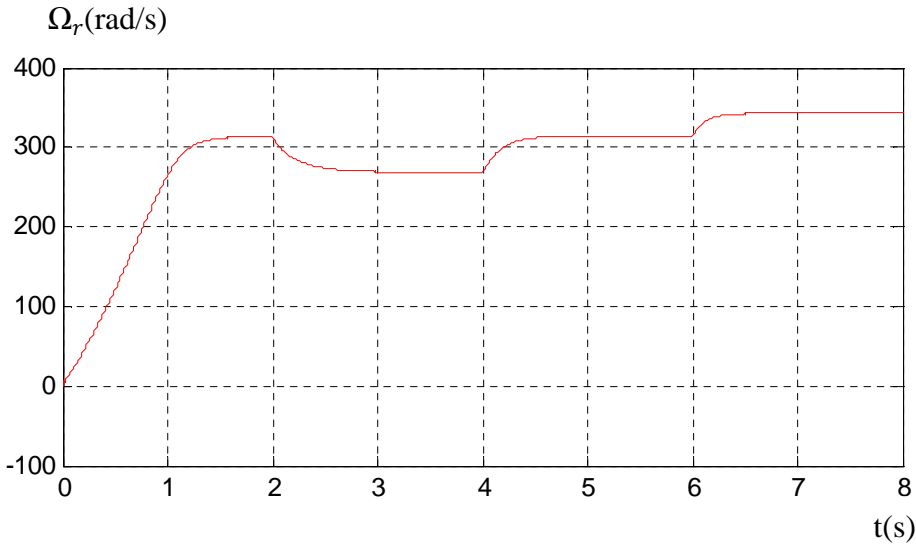
(a)



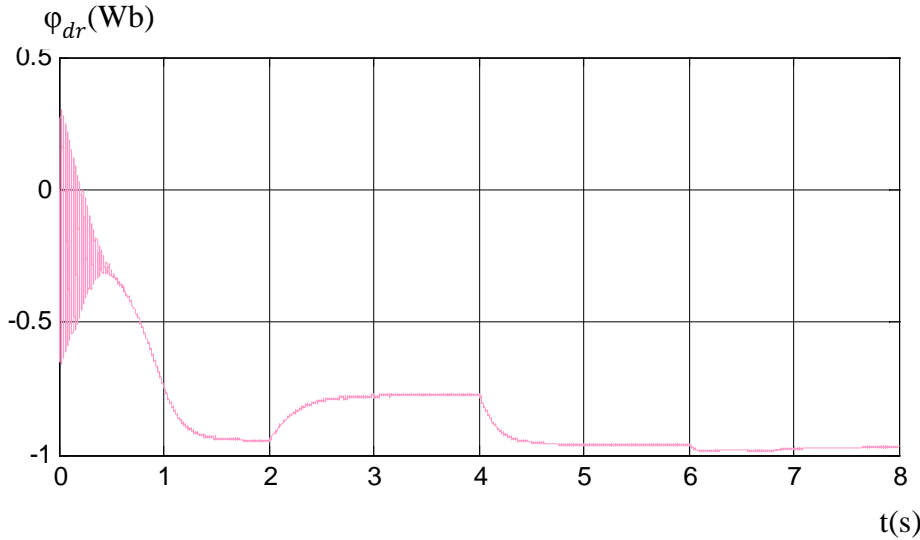
(b)



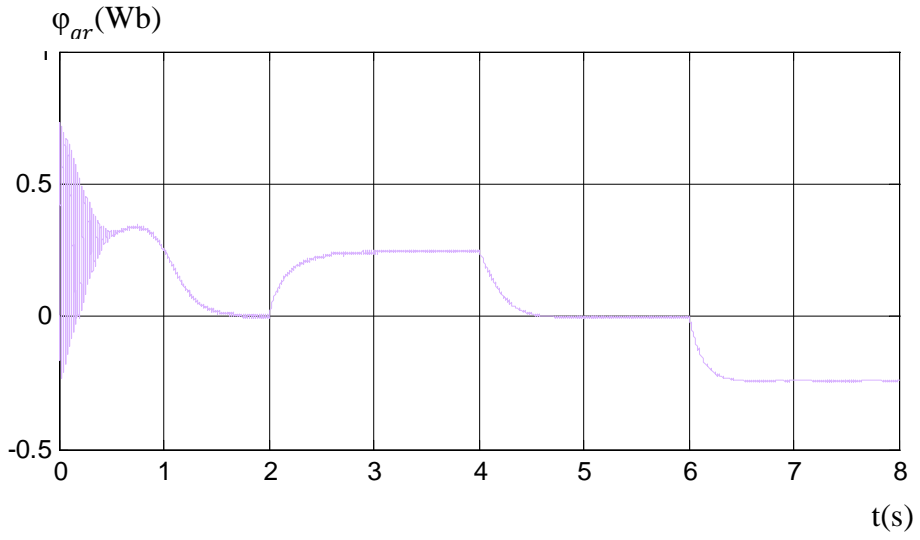
(c)



(d)



(e)



(f)

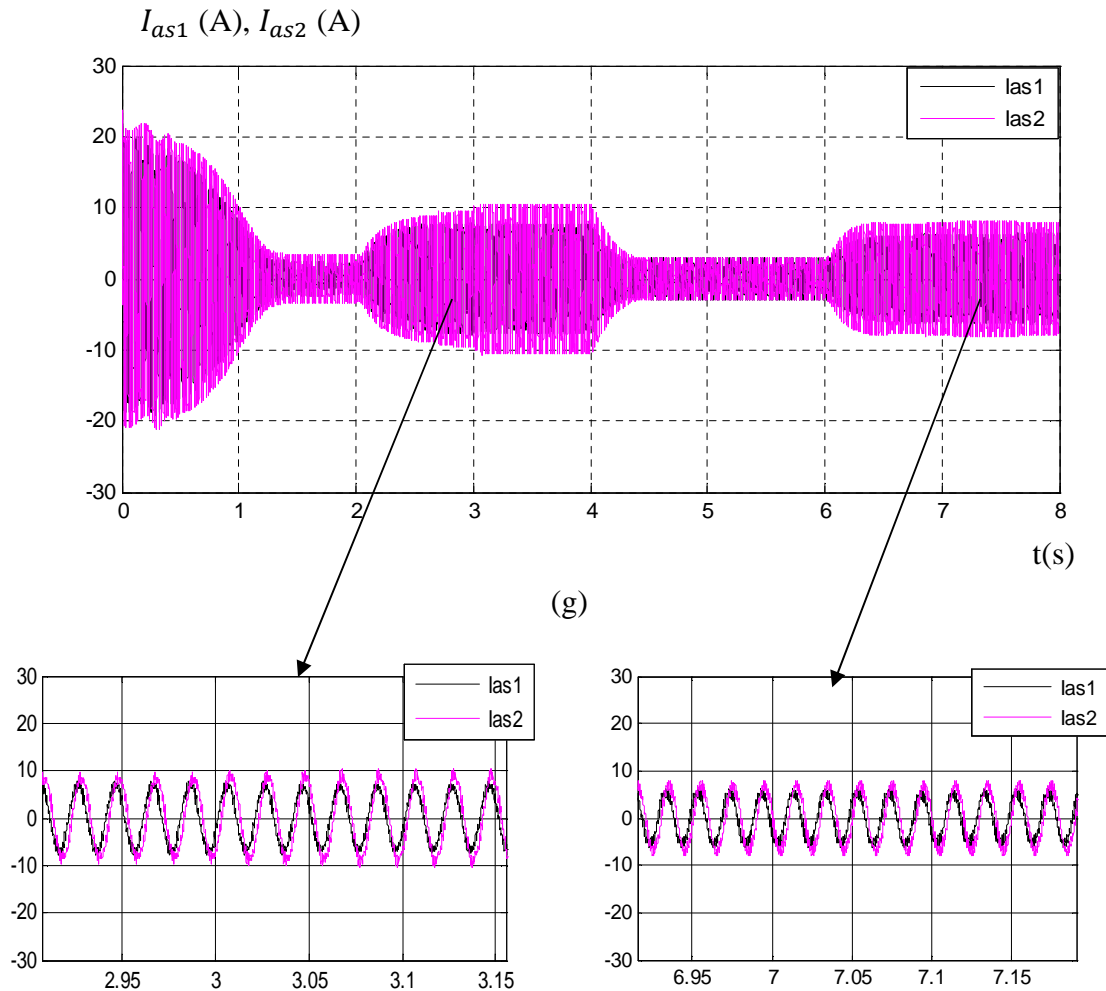


Figure II-6 : évolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs de tension MLI, suivi de l'application des charges $C_r=14$ et $C_r=-14$ respectivement entre les intervalles de temps $t= [2\ 4]$ et $t= [6\ 8]$

Interprétation des résultats

La figure (II.6) représente la réponse de la MASDE alimentée par des convertisseurs de fréquences à commande MLI sinus-triangle suivi de l'application des charges nominales $C_r=14\text{N.m}$ et -14 N.m respectivement entre les intervalles de temps $t= [2\ 4]$ s et $t= [4\ 8]$ s

Au démarrage la machine présente des oscillations et qui stabilise à 0.5s. Le couple électromagnétique atteint sa valeur maximale 60(N.m) et présente des oscillations qui disparaissent aux bout de 0.5s, puis il diminue d'une façon presque linéaire et se stabilise à une valeur qui corresponde aux frottements de la machine. la vitesse de rotation augment jusqu'à une valeur proche de synchronisme.

A partir de l'instant $t=2\text{s}$ en applique la charge $C_r1=14\text{N.m}$ couple positif 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, ce qui signifie que la MASDE absorbe la puissance active et réactive de la source.

A l'instant $t=6s$ on applique un couple négatif $C_r=-14N.m$ alors la machine est en fonctionnement génératrice. Le couple électromagnétique suit le couple résistant négatif, on constate que la vitesse et les courants statoriques selon l'axe quadrature augmentent puis ils stabilisent respectivement. Par contre on observe des diminutions par le couple électromagnétique, les courants statoriques selon l'axe direct et les flux suivants les deux axes (d,q) diminuent puis ils stabilisent respectivement. Le produit du courant et de la tension est négatif ce qui signifie que la MASDE fournit de la puissance active et absorbe une puissance réactive pour sa magnétisation.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une description de la machine asynchrone à double étoile (MASDE), ensuite nous avons étudié la modélisation de cette dernière puis celle des convertisseurs associés. La modélisation nous a permis d'établir un modèle mathématique de la machine dont la complexité a été réduite tout en adoptant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, ainsi nous avons utilisé la transformation de Park et le système d'équations d'états de la machine que nous avons validé à travers une simulation numérique. Enfin on a terminé par donner les résultats de simulations de l'alimentation de la MASDE par deux onduleurs de tension alimentés par le réseau électrique ainsi que l'interprétation des résultats obtenus.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de la commande vectorielle de la MASDE, et la modélisation du système de pompage éolien.

Chapitre III

***Commande
vectorielle de la
machine
asynchrone à double étoile***

III Commande vectorielle de la machine asynchrone à double étoile

III.1 Introduction

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

En 1972 blachke a proposé une méthode, dit « commande vectorielle », permettant d'obtenir une situation pour la machine asynchrone équivalente à celle de la machine à courant continu à excitation séparé.

Dans ce chapitre nous allons présentes en première lieu la modélisation de la chaine de conversion de l'éolienne puis en passe à l'étude du principe de la commande vectorielle d'une GASDE par orientation de flux, ensuit les performances de la commande seront quantifiées pour des variations de charge puis de vitesses. Enfin on termine par donner les résultats de simulation et leurs interprétations.

III.2 Modélisation du système éolienne

III.2.1 Modélisation de la vitesse du vent

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie, car la puissance éolienne dans les conditions optimales évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel [1].

La variation de la vitesse du vent est aléatoire, ce qui entraine des caractéristiques fluctuantes [21], elle est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [1].

$$V = f(t) \quad (\text{III.1})$$

III.2.2 Zone de fonctionnement d'une éolienne

La puissance maximale qui peut être produite (captée) par une éolienne représente sa puissance nominale. La vitesse du vent pour laquelle la puissance nominale de l'éolienne est atteinte est appelée vitesse nominale du vent. 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 à laquelle l'éolienne est conçue pour s'arrête afin de protéger ses parties mécaniques 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. La production de la puissance varie avec la vitesse du vent, comme il est illustré sur la figure(III.1).

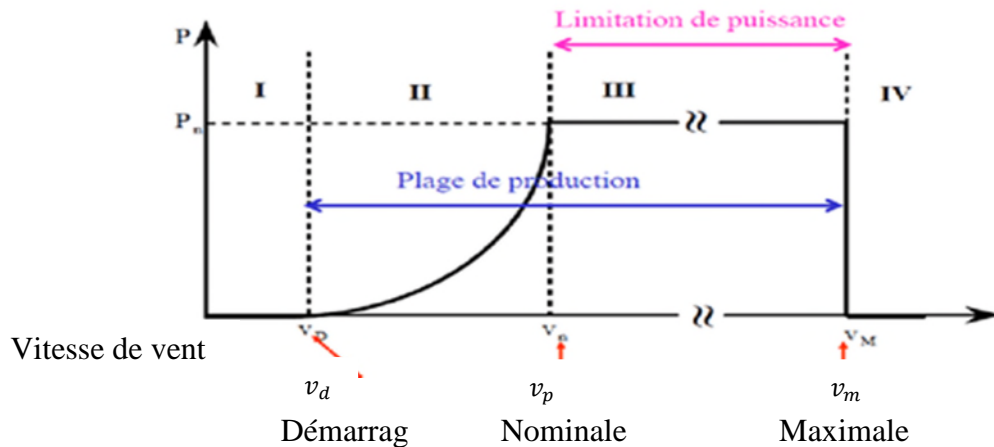


Figure III. 1: courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

V_d : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Elle varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V_n : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Elle varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

V_m : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. V_m vaut 25m/s

•**Zone I** : $V < V_d$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

•**Zone II** : $V_d < V < V_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent, différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite, cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

•**Zone III** : $V_n < V < V_m$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

•**Zone IV** : c'est une zone dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

III.2.3 Modélisation de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active s de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active s de l'éolienne est donnée par [22] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho s v^3 \quad (\text{III.2})$$

Où :

ρ : La densité d'air ($\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$).

s : Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon de cercle est déterminé par la longueur de la pale R . Où : $s = \pi R^2$.

v : La vitesse du vent.

La puissance aérodynamique P_{aero} qui est convertie par une turbine dépend du coefficient de puissance C_p

$$P_{aero} = C_p (\lambda) \cdot P_v \tag{III.3}$$

C_p Est la valeur du coefficient de puissance, dépend de la vitesse de rotation de la turbine et la vitesse du vent et admet une valeur maximale théorique, 0.5926

On définit aussi λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire de rotation de la turbine et la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \tag{III.4}$$

Le couple aérodynamique est le rapport de la puissance aérodynamique à la vitesse de rotation de la turbine.

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \frac{\rho s v^3 C_p (\lambda)}{2 \Omega_t} \tag{III.5}$$

III.2.4 Modélisation du multiplicateur

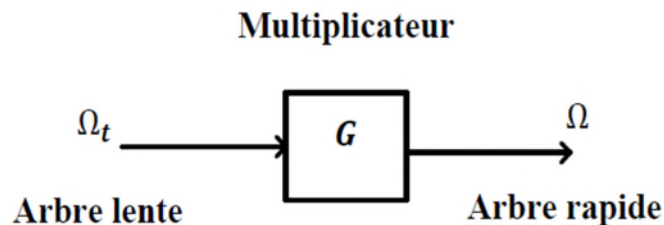


Figure III. 2: multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est modélisé par un simple gain (G). Les pertes énergétiques dans cette composante sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{generatrice}}{G} \tag{III.6}$$

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport du multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{generatrice} = \frac{C_{turbine}}{G} \tag{III.7}$$

III.2.5 Modélisation de l'arbre de la machine

Le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est caractériser par l'équation différentielle suivante :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_r}{dt} = C_g - C_{em} - (f_m + f_t)\Omega_r \quad (\text{III.8})$$

Où:

J_m : Inertie de la machine.

J_t : Inertie de la turbine

f_m : Coefficient de frottement de la machine.

f_t : Coefficient de frottement des pales.

C_g : Couple statique fournie par l'éolienne.

III.3 Convertisseurs statiques

III.3.1 Le redresseur

Le redresseur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants continue sa partir d'une source d'énergie électrique alternatif, c'est un convertisseur de type alternatif/continue.

La figure (III.3) représente le redresseur tout diodes ; triphasé en pont de graetz.

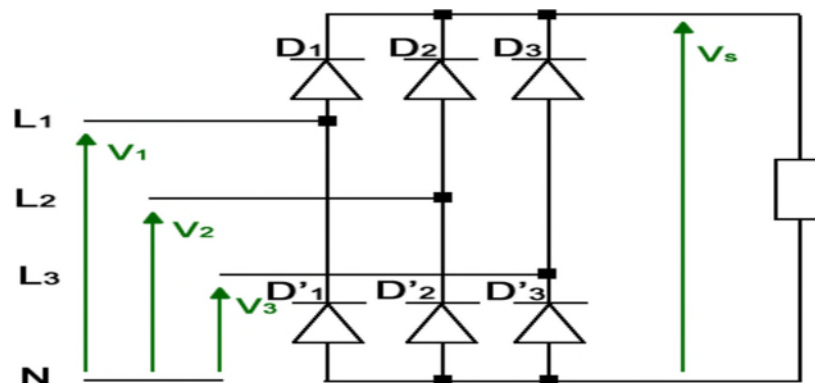


Figure III. 3: Schéma représentatif d'un redresseur à diodes en pont de graetz

Pour simplifier l'étude du modèle de redresseur, on suppose que :

- Les diodes sont des interrupteurs parfaites c'est-à-dire présentant une tension nulle à l'état passante, un courant nul à l'état bloqué ;
- La commutation des interrupteurs est instantanée.

On alimente le redresseur avec trois tensions triphasées équilibrées : $v_1(t)$; $v_2(t)$; $v_3(t)$

Telles que :

$$\begin{cases} v_1(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t) \\ v_2(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.9)$$

La valeur instantanée de la tension redressée peut être exprimée comme suit :

$$U_d = \max[v_1(t), v_2(t), v_3(t)] - \min[v_1(t), v_2(t), v_3(t)] \quad (III.10)$$

La valeur moyenne de la tension redressée peut être exprimée comme suit :

$$U_{dmoy} = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} \cdot v \quad (III.11)$$

III.4 Modélisation de bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité qui a pour but le lissage de la tension. L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif [23].

$$V_{dc} = \int \frac{1}{c_{dc}} \cdot I_c dt \quad (III.12)$$

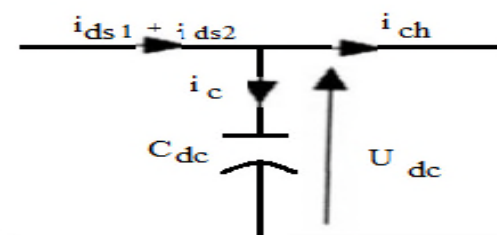


Figure III. 4: Représentation du bus continu

III.5 Commande vectorielle

III.5.1 Principe de la commande vectorielle

Le but de cette commande est d'assimiler le comportement de la GASDE à celui d'une machine à courant continu à excitation séparé [16].

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 et 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 [29].

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

$$C_{em} = K\varphi I_a = K' I_a \cdot I_f \tag{III.24}$$

Avec :

φ : Flux imposé par le courant d'excitation ;

I_a, I_f : Courant d'induit ;

K, K' : Constantes.

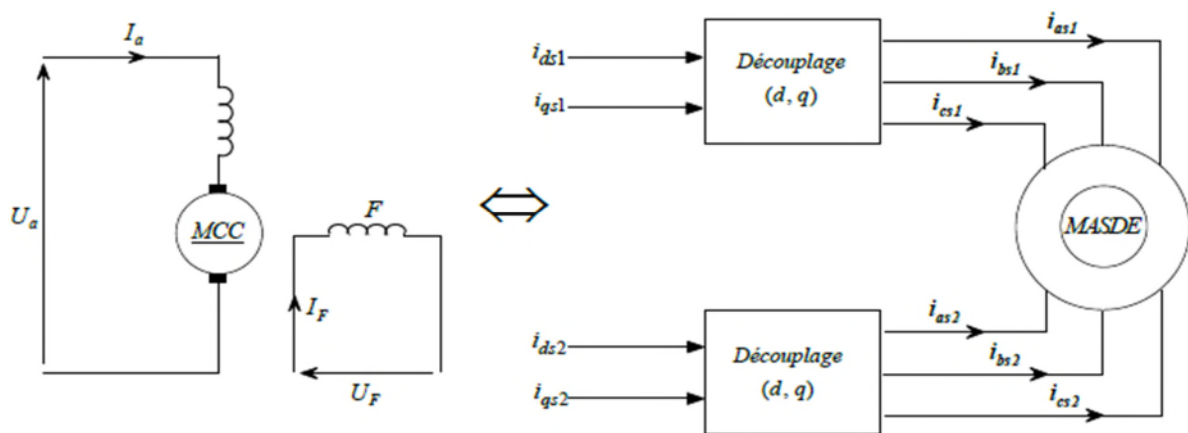


Figure III. 5: principe de pilotage de la MCC et de la MASDE

III.5.2 Théorie du flux orienté

Le choix des axes d'orientation peut être fait selon l'une des directions des flux de la machine à savoir le flux rotorique, statorique ou d'entrefer [30].

- Orientation du flux rotorique avec les conditions ;
- Orientation du flux statorique avec les conditions ;
- Orientation du flux d'entrefer avec les conditions.

Dans les trois cas le couple est proportionnel au produit du flux par la composante du courant statorique en quadrature avec le flux.

La commande par orientation du flux rotorique consiste à réaliser un découplage entre les grandeurs génératrices du couple électromagnétique et du flux rotorique. Ceci peut se faire en coïncidant le flux rotorique avec l'axe d du référentiel lié au champ tournant. Ainsi, en agissant sur les variables i_{dS} et i_{qS} , les grandeurs φ_r et C_{em} sont commandées séparément; cela se traduit par [31] :

$$\varphi_{qr} = 0. \tag{III.25}$$

L'expression de couple devient :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{qS1} + i_{qS2})\varphi_r] = K^* \varphi_r i_r \tag{III.26}$$

D'après l'équation (III.26) 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.5.3 Différentes méthodes de la commande vectorielle

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

III.5.3.1 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 [13].

III.5.3.2 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.5.4 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.10) représente le schéma de principe de la commande à flux orienté

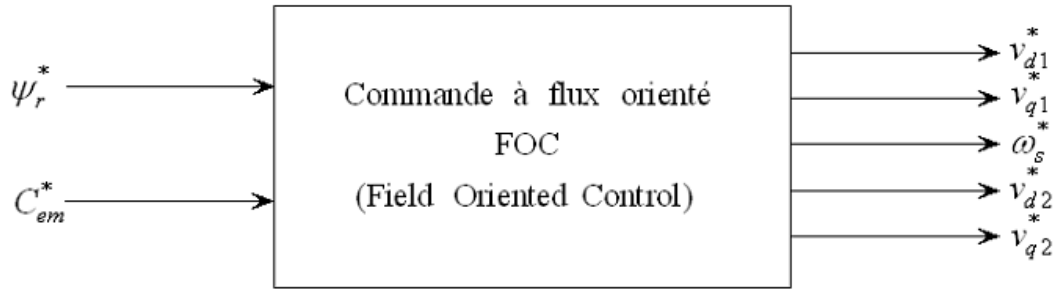


Figure III. 6: Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC)

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

$$R_r \cdot i_{dr} = 0 \Rightarrow i_{dr} = 0 \quad (III.27)$$

Et

$$R_r \cdot i_{qr} + \omega_{gl}^* \cdot \varphi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \cdot \varphi_r^*}{R_r} \quad (III.28)$$

A partir des équations (II.22) et (II.23), on trouve :

$$i_{dr} = \frac{\varphi_r^*}{L_m + L_r} - \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (III.29)$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qr1} + i_{qr2}) \quad (III.30)$$

En introduisant (III.29) et (III.30) dans le système d'équations des flux statoriques, on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \lambda_1 \cdot i_{ds1} + L_r B i_{ds2} + B \cdot \varphi_r^* \\ \varphi_{qs1} = \lambda_1 \cdot i_{qs1} + L_r B i_{qs2} \\ \varphi_{ds2} = \lambda_2 \cdot i_{ds2} + L_r B i_{ds1} + B \cdot \varphi_r^* \\ \varphi_{qs2} = \lambda_2 \cdot i_{qs2} + L_r B i_{qs1} \end{cases} \quad (III.31)$$

Avec

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

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

En introduisant (III.27) dans (III.29), on tire :

$$\varphi_r^* = L_m (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (III.32)$$

A partir de l'équation(III.30), on trouve :

$$L_m (i_{qs1} + i_{qs2}) = -(L_m + L_r)i_{qr} \quad (III.33)$$

En remplaçant (III.31) et (III.33) dans le système d'équations des tensions statoriques, on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds1}^* = R_{s1} \cdot i_{ds1} + L_{s1} \frac{d}{dt} i_{ds1} - \omega_s^* (L_{s1} \cdot i_{qs1} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs1}^* = R_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{s1} \frac{d}{dt} i_{qs1} - \omega_s^* (L_{s1} \cdot i_{ds1} + \varphi_r^*) \\ v_{ds2}^* = R_{s2} \cdot i_{ds2} + L_{s2} \frac{d}{dt} i_{ds2} - \omega_s^* (L_{s2} \cdot i_{qs2} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs2}^* = R_{s2} \cdot i_{qs2} + L_{s2} \frac{d}{dt} i_{qs2} - \omega_s^* (L_{s2} \cdot i_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (III.34)$$

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} ; \text{Et } \omega_{gl}^* = \omega_s^* - \omega_r.$$

En introduisant l'équation (III.30) dans (III.28), on tire :

$$\omega_{gl}^* = \frac{R_r L_m (i_{qs1} + i_{qs2})}{(L_m + L_r) \varphi_r^*} \quad (III.35)$$

A partir de la relation (III.25), on trouve :

$$i_{ds1}^* + i_{ds2}^* = \frac{(L_m + L_r) C_{em}^*}{p L_m \varphi_r^*} \quad (III.36)$$

Le système d'équations électriques (III.34) 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 :

$$\begin{cases} v_{ds1r} = R_{s1} \cdot i_{ds1} + L_{s1} \frac{d}{dt} i_{ds1} \\ v_{qs1r} = R_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{s1} \frac{d}{dt} i_{qs1} \\ v_{ds2r} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + L_{s2} \frac{d}{dt} i_{ds2} \\ v_{qs2r} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + L_{s2} \frac{d}{dt} i_{qs2} \end{cases} \quad (III.37)$$

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

$$\begin{cases} v_{ds1}^* = v_{ds1r} - v_{ds1c} \\ v_{qs1}^* = v_{qs1r} + v_{qs1c} \\ v_{ds2}^* = v_{ds2r} - v_{ds2c} \\ v_{qs2}^* = v_{qs2r} + v_{qs2c} \end{cases} \quad (III.38)$$

Où :

$$\begin{cases} v_{ds1c} = \omega_s^* (L_{s1} \cdot i_{qs1} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs1c} = \omega_s^* (L_{s1} \cdot i_{ds1} + \varphi_r^*) \\ v_{ds2c} = \omega_s^* (L_{s2} \cdot i_{qs2} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs2c} = \omega_s^* (L_{s2} \cdot i_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (III.39)$$

III.5.5 Principe du défluxage

Le flux de référence est donné par un bloc de défluxage. Ce bloc de défluxage est nécessaire, car il sert à diminuer le flux et donc le couple lors du fonctionnement en survitesse [31].

Les équations qui traduisent le bloc de défluxage s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_r^* = \varphi_n & \text{Si } |\Omega| \leq \Omega_n \\ \varphi_r^* = \frac{\varphi_n \Omega_n}{|\Omega|} & \text{si } |\Omega| > \Omega_n \end{cases} \quad (III.40)$$

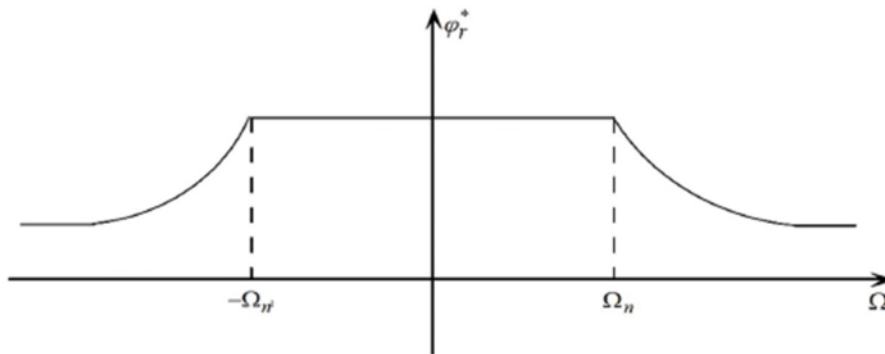


Figure III. 7: Schéma de défluxage

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.5.6 Application de la commande vectorielle pour la GASDE

Le schéma global du système est représenté sur la figure (III.13)

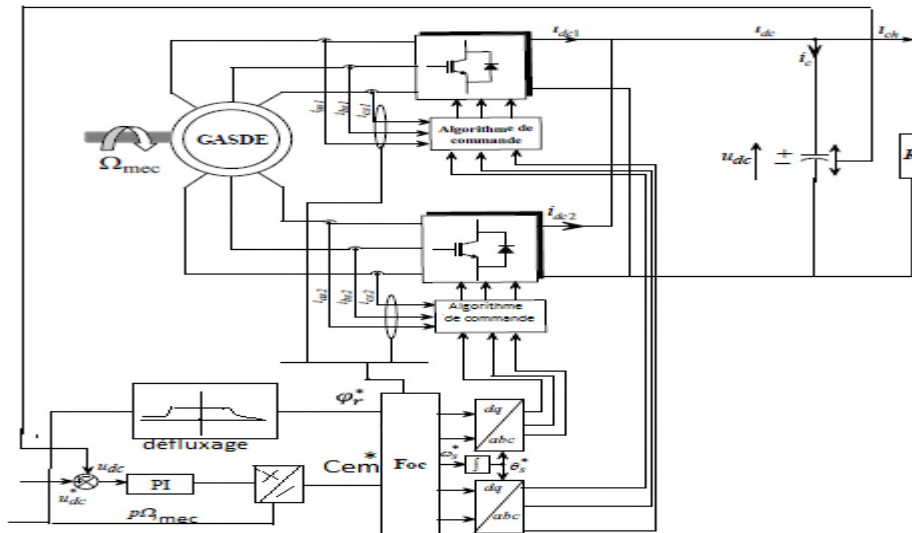


Figure III. 8:Schéma global du système étudié

III.5.7 Simulation et interprétation des résultats

Le système à étudier est constitué d'une GASDE connectée à deux redresseur/onduleur et commandée suivant la stratégie de commande présentée précédemment. Afin de montrer les résultats de la simulation obtenus nous avons simulé le système dans différents cas de fonctionnement tel que la variation de charge à vitesse fixe, et de variation de vitesse à charge fixe.

Les résultats de simulation de système étudié basée sur la GASDE obtenus sous l'environnement MATLAB/simulink sont présentés et commentés.

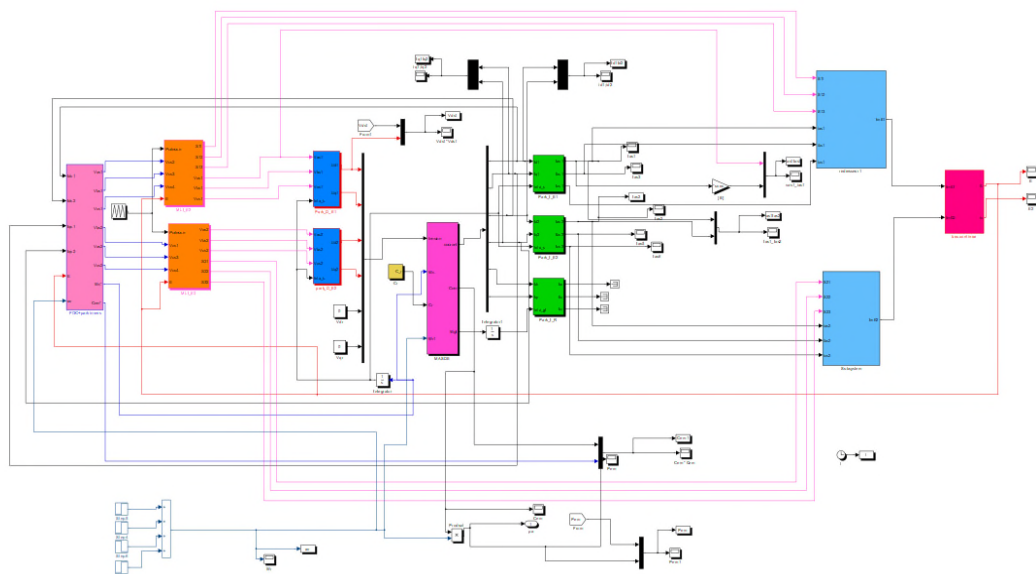


Figure III. 9: schéma block de la commande vectorielle de la GASDE

III.5.7.1 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 0.5]s, on a opté à charger initialement une capacité de 100 μF , afin de fournir de l'énergie réactive nécessaire pour l'amorçage. A l'instant $t = 3s$, on insère une charge résistive de 75% de sa valeur nominale, et à l'instant $t = 6s$ 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.10).

La figure (III.11) 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.12) et (III.13).

Les figures (III.14) 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 montré dans les figures (III.15 ; III.16).

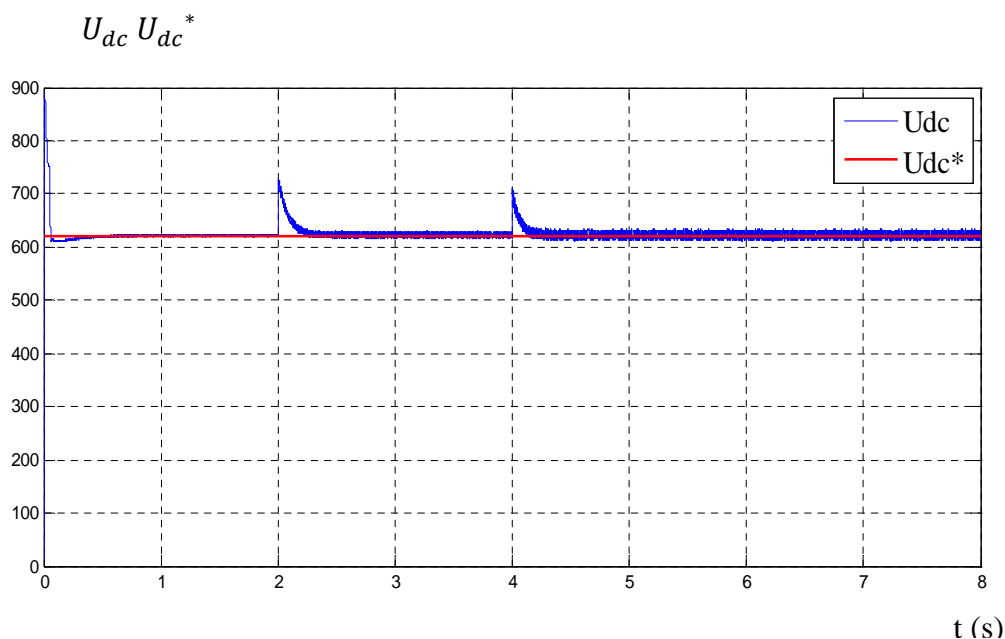


Figure III. 10: Allure de la tension de bus continu

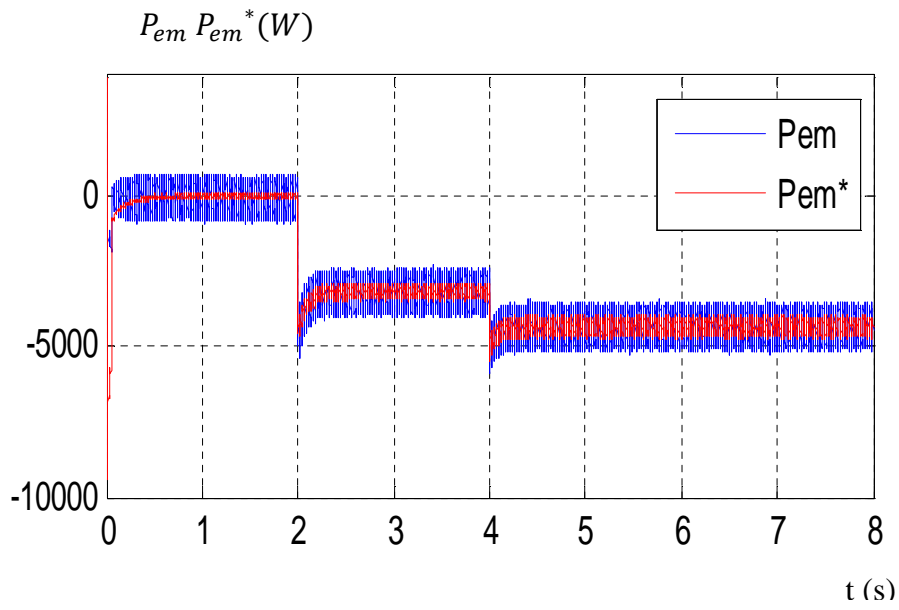


Figure III. 11: Allure de puissance électromagnétique

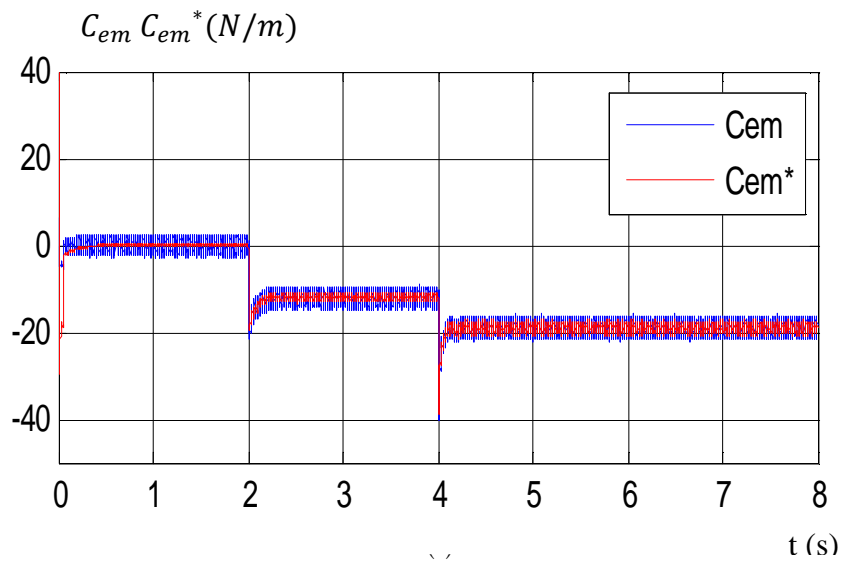


Figure III. 12: Allure du couple électromagnétique

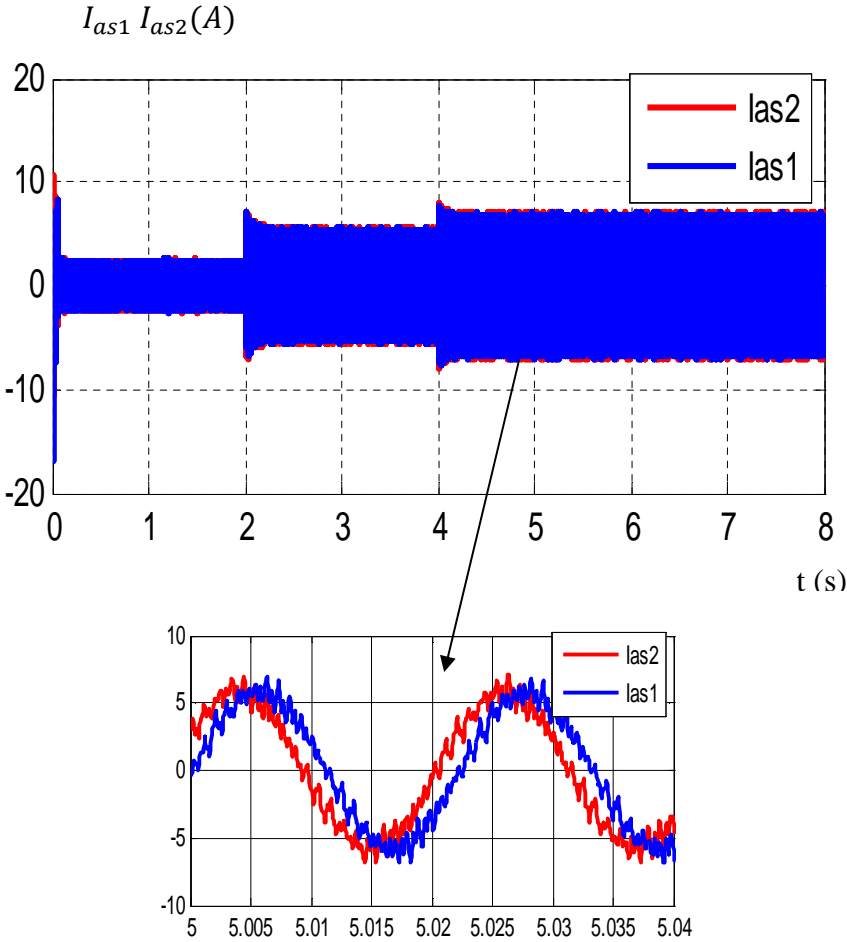


Figure III. 13: Allure des courants statorique des deux étoiles

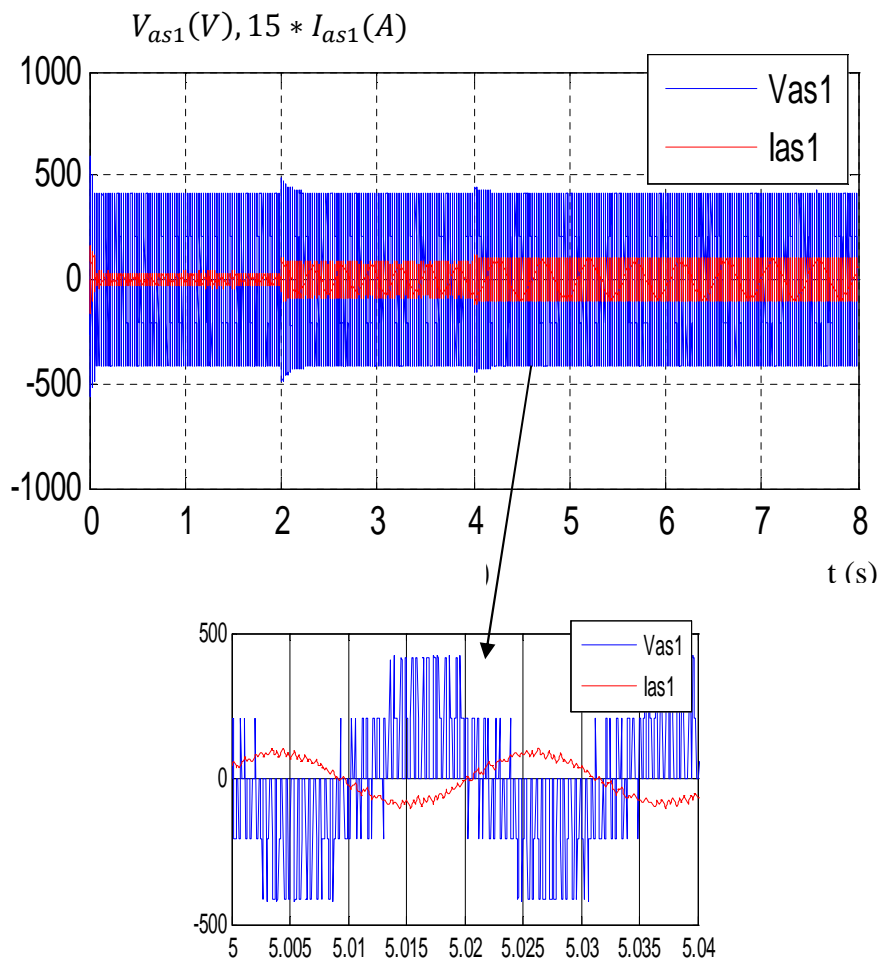


Figure III. 14: Allure du courant et tension statoriques

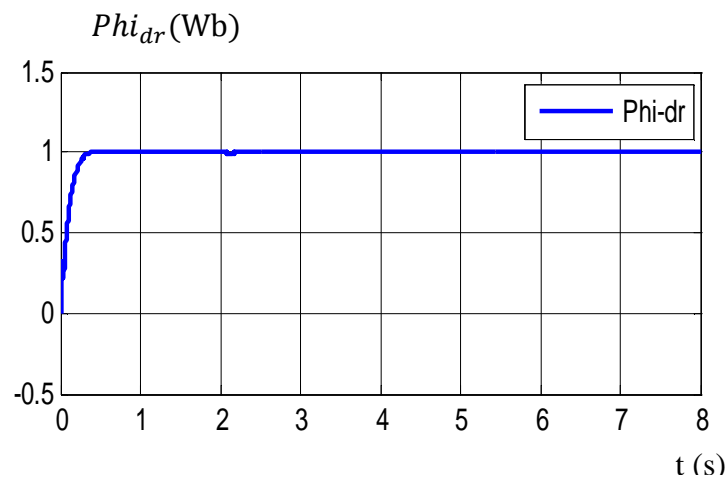


Figure III. 15 : Allure du flux rotorique direct

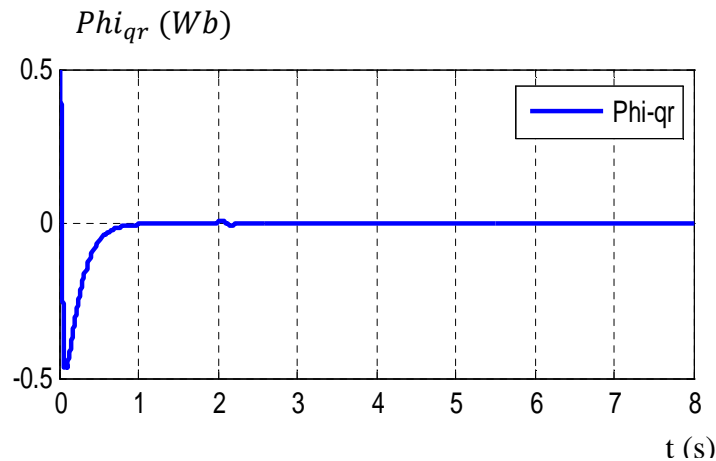


Figure III. 16: Allure du flux en quadrature

III.5.7.2 Influence de la variation de la vitesse d'entraînement

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats de simulation obtenus pour une vitesse d'entraînement variable et une charge fixe.

Les résultats de simulation obtenus pour la variation de vitesse. Il est à noter que le cas de faible variation de vitesse a uniquement pour but un caractère illustratif.

La tension de bus continue est bien contrôlée comme le montrent les figures (III.17) et (III.18). L'analyse de la figure (III.18) a permis de voir le comportement du couple électromagnétique en fonction de la variation de vitesse, où on constate que le couple électromagnétique est insensible à cette variation.

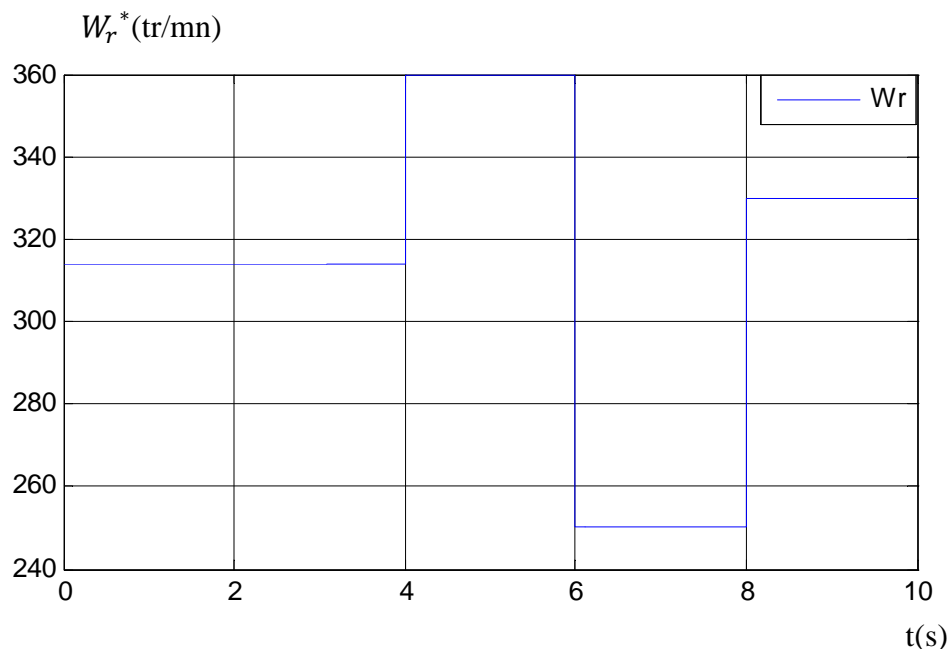
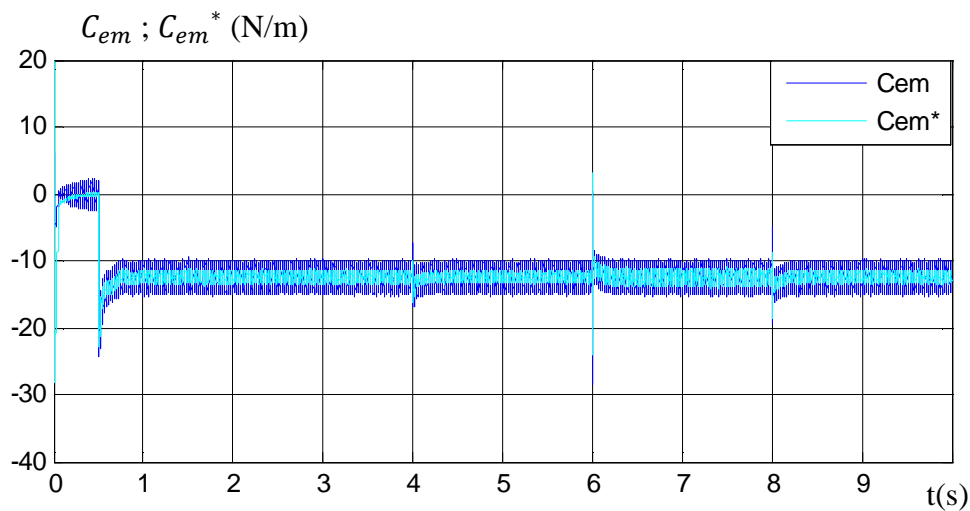
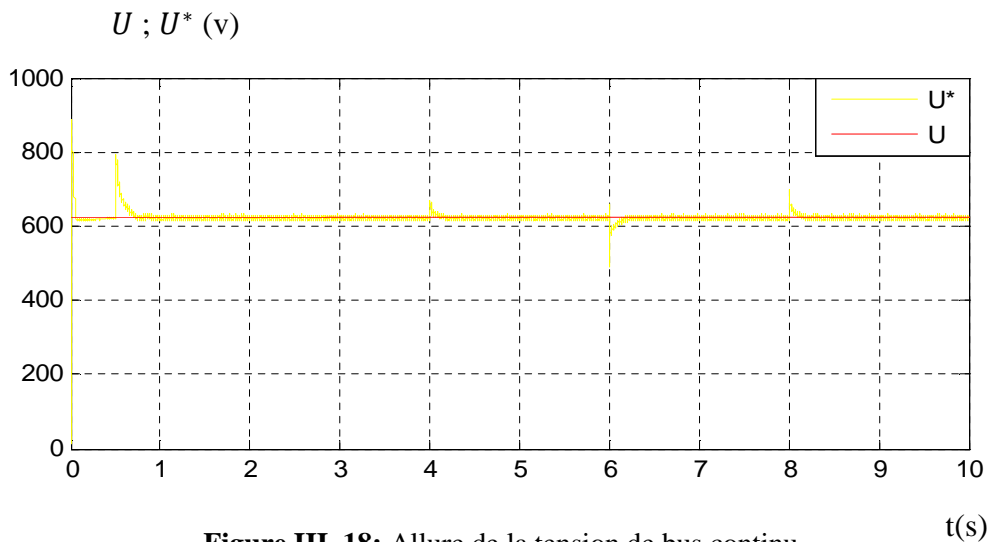


Figure III. 17: Vitesse d'entraînement



III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait la modélisation des différents éléments de la chaîne de en commençant par la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne, puis celles des convertisseurs associés ainsi que la modélisation de bus continu.

On à terminer par la modélisation et la simulation de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la GASDE, nous avant étudié la méthode indirecte avec régulation de bus Continu. On à constater que le bus continu est constant par rapport à la variation de la vitesse et de la charge et cela est dus la robustesse de la commande vectorielle

Dans le prochain chapitre un système de pompage à base de la génératrice à double étoile sera étudié après modélisation et dimensionnement du fonctionnement global.

Chapitre VI

***Dimensionnement du système
du pompage éolienne***

IV. Dimensionnement du système du pompage éolienne

IV.1 Introduction

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. L'utilisation de système de pompage éolienne est une solution pour satisfaire les besoins en eau dans ces zones. de tel système représente plusieurs avantages du fait de leur flexibilité et leur fiabilité.

Dans les chapitres précédents nous avons présentés la modélisation et la simulation de chaque composant du système éolien, nous allons maintenant passer au dimensionnement et simulation du système globale (système de pompage éolien).

Le présent chapitre porte sur le dimensionnement des différentes parties de la chaîne de conversion en commençant par la puissance hydraulique jusqu'à la puissance de la génératrice asynchrone à double étoile en passant par le moteur asynchrone à cage, et la simulation du système globale en utilisant un profil de vent variable. En utilisant le logiciel Matlab/Simulink.

IV.2 Généralités sur le pompage

IV.2.1 Définition de la pompe

Une pompe est une machine utilisée pour convertir la puissance d'entrée mécanique en puissance liquide. Elle est couplée directement au moteur et elle est caractérisée par un couple, vitesse et un débit. Une bonne adaptation entre la pompe et le moteur mène à de bons résultats. On appelle pompe tout appareil qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande pression. Ainsi, d'après cette définition on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide. L'augmentation de la pression du liquide véhiculé par la pompe a eu lieu suite à la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe.

IV.2.2 Les différents systèmes de pompage

IV.2.2.1 Pompage mécanique

Le principe de fonctionnement est le suivant : un rotor éolien d'une vingtaine de pales entraîné par un système de bielle-manivelle, et une pompe à piston plongée au fond du puits (Figure.III.5). C'est un système qui convient assez bien pour les zones peu ventées, avec des besoins en eau journaliers n'excédant pas les 20 m³ et des profondeurs de puits ne dépassant pas les 50 m. Avec des puits plus profonds, les quantités d'eau pompées sont faibles, et les risques de rupture de la tringlerie de pompage sont accrus compte tenu des efforts mécaniques[24].

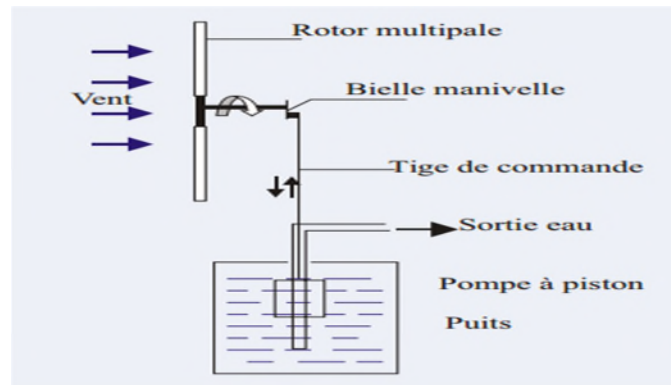


Figure VI. 1 : schéma d'une éolienne multi-pale [24]

Les éoliennes de pompage mécanique ont leurs avantages et inconvénients

- **Les avantages**
 - la fiabilité ;
 - la facilité d'entretien ;
 - moins chère.
- **Les inconvénients**

Le seul inconvénient réside dans le fait qu'elles doivent être installées directement au-dessus du puits.

IV.2.2.2 Le pompage électrique

Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de trouver près de la source d'approvisionnement en eau. Le système éolien électrique commande une pompe électrique, (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source (un puits ou un étang) et la refoule à l'endroit de son utilisation (un abreuvoir à bétail, un étang ou un système d'irrigation). La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électriques ne comprennent pas de batteries. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie [25].

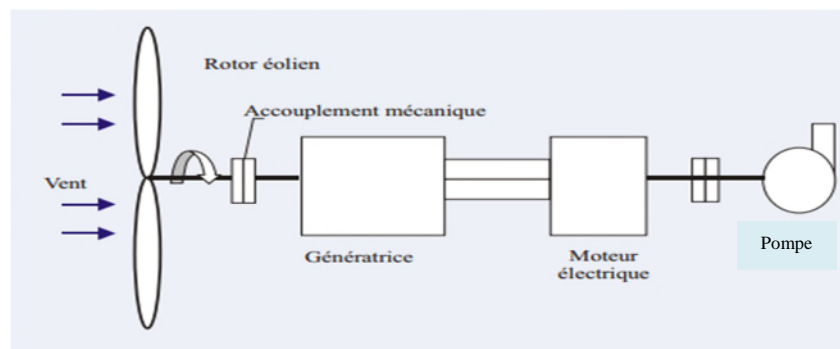


Figure VI. 2: schéma d'un aérogénérateur alimente une pompe [24]

IV.2.3 Type de pompes utilisées

Il y a plusieurs types disponibles pour les systèmes de pompage. On distingue principalement deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétriques.

IV.2.3.1 Pompe volumétrique

Les pompes volumétriques encore appelées pompes à cavité progressive. Utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palettes et à engrenages [26] [27].

- Leurs principaux atouts sont les suivants :
Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à $5 \text{ m}^3/\text{h}$) et aux grandes hauteurs ;

Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçant.

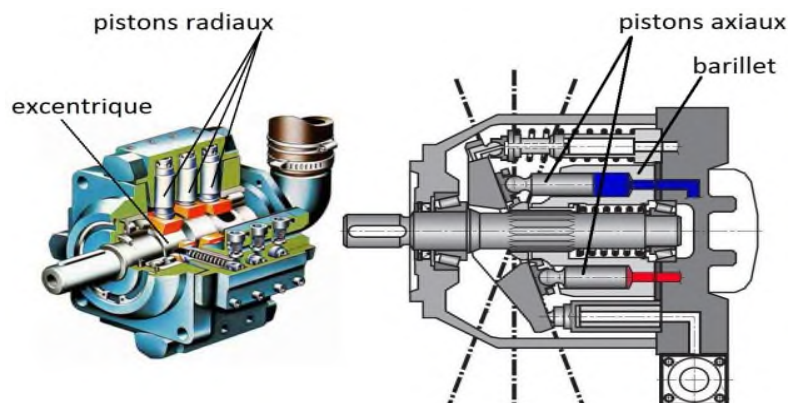


Figure VI. 3: pompe volumétrique (pompe à piston)[26]

IV.2.3.2 Pompe centrifuge

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse [26].

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage. (Particulièrement intéressant dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques car la pompe tourne même par très faible ensoleillement)
- Il n'y a pas ou presque pas d'aspiration. Elles doivent être amorcées pour fonctionner de manière à éviter tout risque de destruction si fonctionnement à sec. Certaines sont auto – amorçant.

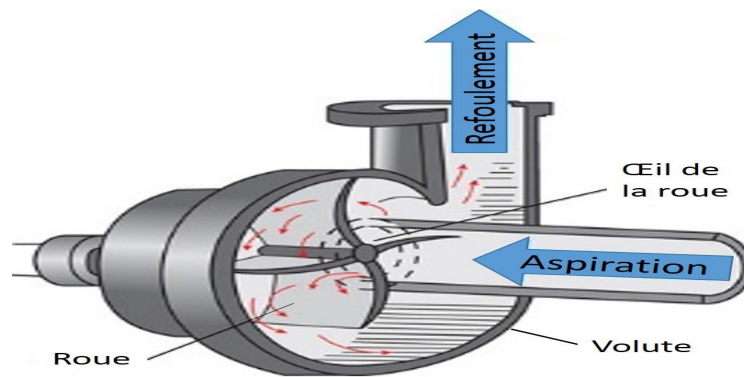


Figure VI. 4: schéma d'une pompe centrifuge[26]

IV.3 Modélisation du groupe motopompe

IV.3.1 Modélisation de la pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois Caractéristique, la hauteur, le débit et la vitesse :

$$F(H, Q, W) = 0$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère généralement la vitesse constante. On peut écrire l'équation de la hauteur manométrique totale (HMT) en fonction de la hauteur géométrique et les pertes de charges par l'équation :

$$HMT = H_g + P_c \quad (VI.1)$$

Avec :

H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation

P_c : Pert de charge produite par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Elle s'exprime de cette façon :

$$P_c = \lambda \left(\frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^5 g} \right) = K_p Q^2 \quad (VI.2)$$

λ : Coefficient des pertes de charge linéaires.

D :Diamètre de la tuyauterie(m)

L : Longueur de la tuyauterie(m)

g : Accélération de la pesanteur locale (m/S^2)

ε :Coefficient des pertes de charge locales.

K_p :Constante de la canalisation.

Q :Le débit de la pompe.

Dans cette application, l'expression de la hauteur manométrique totale est donnée par un modèle PLEIDER-PETERMAN

$$HMT = \alpha_0 \omega_r^2 - \alpha_1 \omega_r Q - \alpha_2 Q^2 \quad (VI.3)$$

Avec :

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$: Des constantes de la pompe.

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{VI.4})$$

Avec :

Ω : vitesse de moteur asynchrone (rad/s).

K_r : Un coefficient de proportionnalité [$(Nm/ras \cdot S^{-1})^2$] qui est donné par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{VI.5})$$

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).

Ω_n : vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

IV.3.2 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Les équations générales (VI.6) décrivent le fonctionnement des moteurs à courant alternatif dans un référentiel $d-q$ se retrouvent dans la littérature technique consacrée aux machines électriques [28].

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{\varphi_{ds}}{dt} - \omega_\alpha \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{\varphi_{qs}}{dt} - \omega_\alpha \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_\alpha - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{dq} = R_s I_{ds} + \frac{\varphi_{ds}}{dt} - (\omega_\alpha - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{VI.6})$$

En réécrivant les équations précédentes dans un référentiel stationnaire $d-q$ ($\omega_\alpha = 0$), on obtient le modèle de la partie électrique du moteur asynchrone :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{\varphi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{qr} \\ 0 = R_s I_{ds} + \frac{\varphi_{ds}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{VI.7})$$

Le rotor du moteur asynchrone à cage étant fermé sur lui-même (court-circuité), on prend V_{dr} et V_{dq} égales à zéro.

Les flux couplés statoriques et rotoriques sont obtenus à partir des inductances propres et mutuelles :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + L_{sr} I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + L_{sr} I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + L_{sr} I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + L_{sr} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{VI.8})$$

L'équation du couple électromagnétique du moteur est :

$$C_{em} = p [\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}] \quad (\text{VI.9})$$

L'équation du mouvement, reliant les parties électrique et mécanique s'écrit comme suit :

$$J \frac{d \Omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - f \Omega_m \quad (\text{VI.10})$$

IV.3.2.1 Equation d'état de la machine asynchrone

Le modèle de la machine asynchrone mise sous forme d'équation d'état de la forme :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \tag{VI.11}$$

Avec :

[A] :Matrice d'évolution.

[B] :Matrice de commande.

[U] : $[V_{ds} V_{qs}]^t$:Vecteur de commande.

Où :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\gamma & \omega_r + \frac{1}{\sigma}\omega & \frac{\alpha}{\tau_r} & \frac{\omega\alpha}{\tau_r} \\ -(\omega_r + \frac{1}{\sigma}\omega) & -\gamma & -\omega\alpha & \frac{\alpha}{\tau_r} \\ \frac{M}{\sigma L_r \tau_s} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega & -\lambda & \omega_r - \frac{M^2}{\sigma L_r L_s} \omega \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega & \frac{M}{\sigma L_r \tau_s} & -\omega_r + \frac{M^2}{\sigma L_r L_s} \omega & -\lambda \end{bmatrix};$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & \frac{M}{\sigma L_r L_s} \end{bmatrix};$$

$$[U] = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix};$$

$$[X] = \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix}.$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}; \tau_s = \frac{L_s}{R_s}; \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}; \alpha = \frac{M}{\sigma L_s}; \gamma = \frac{1}{\sigma \tau_s}; \lambda = \frac{1}{\sigma \tau_r}$$

IV.4 Dimensionnement du système de pompage éolienne

IV.4.1 Dimensionnement du groupe motopompe

Le dimensionnement de moteur asynchrone qui entraîne la pompe se fait selon la quantité d'eau demandée, le débit d'eau lié à la puissance mécanique absorbé par la pompe est donné par la relation suivante :

$$Q = \frac{p_m \cdot \eta_p}{\rho \cdot g \cdot H} \quad (\text{VI.12})$$

Avec :

Q : Débit de l'eau ;

p_m : Puissance de la pompe ;

η_p : Rendement de la pompe ;

ρ : La masse volumique de l'eau ;

g : Accélération de la pesanteur ;

H : Hauteur manométrique total.

Pour prévoir certain imprévus d'exploitation, il serait prudent de majorer la puissance absorbée par la pompe des quantités suivantes [32] :

- 30 % pour une puissance absorbée inférieure à 4 KW.
- 20% pour une puissance absorbés compris entre 4 et 20 KW.
- 10% pour une puissance absorbée supérieure à 20 KW.

Dans notre étude la puissance mécanique de la pompe est 2747.5 W, on applique alors une marge de sécurité de 30 %. Ce qui veut dire que la puissance mécanique du moteur doit être supérieure ou égale à 3571.75 W.

Nous avons choisi un moteur asynchrone dont la puissance mécanique est 4000 W.

Connaissant le rendement du moteur, la puissance électrique absorbée par le moteur est :

$$p_a = p_u / \eta_m \quad (\text{VI.13})$$

Tel que :

p_u : Puissance du moteur asynchrone ;

η_m : Rendement du moteur asynchrone

Le rendement du moteur est estimé à 0.96, la puissance absorber par le moteur serait :

$$p_a = \frac{4000}{0.96} = 4166.66 \text{ W}$$

IV.4.2 Dimensionnement de la génératrice asynchrone double étoile

La puissance que doit fournir la génératrice asynchrone à double étoile sera déterminée par la puissance nominale demandée par l'ensemble motopompe.

La puissance nominale demandée par le moteur est de 4166.66 W.

Le rendement de l'onduleur est de l'ordre de 0.97 alors la puissance que doit générer le bus continu est :

$$p_b = p_m / \eta_o \tag{VI.14}$$

$$p_b = \frac{4166.66}{0.97} = 4295.53W .$$

Le rendement des convertisseurs est de l'ordre 0.96, la puissance que doit générer la génératrice asynchrone à double étoile est :

$$p_G = p_b / \eta_c \tag{VI.15}$$

$$p_G = 4474.5W$$

La puissance que la génératrice doit fournir est 4474.5W alors nous avons choisi une génératrice asynchrone à double étoile de 4500W.

IV.5 Simulation du système globale

La figure (VI.5) montre le schéma global du système de pompage éolien, Pour tester le bon fonctionnement de l'ensemble des éléments du système on a utilisé l'environnement Matlab/Simulink,

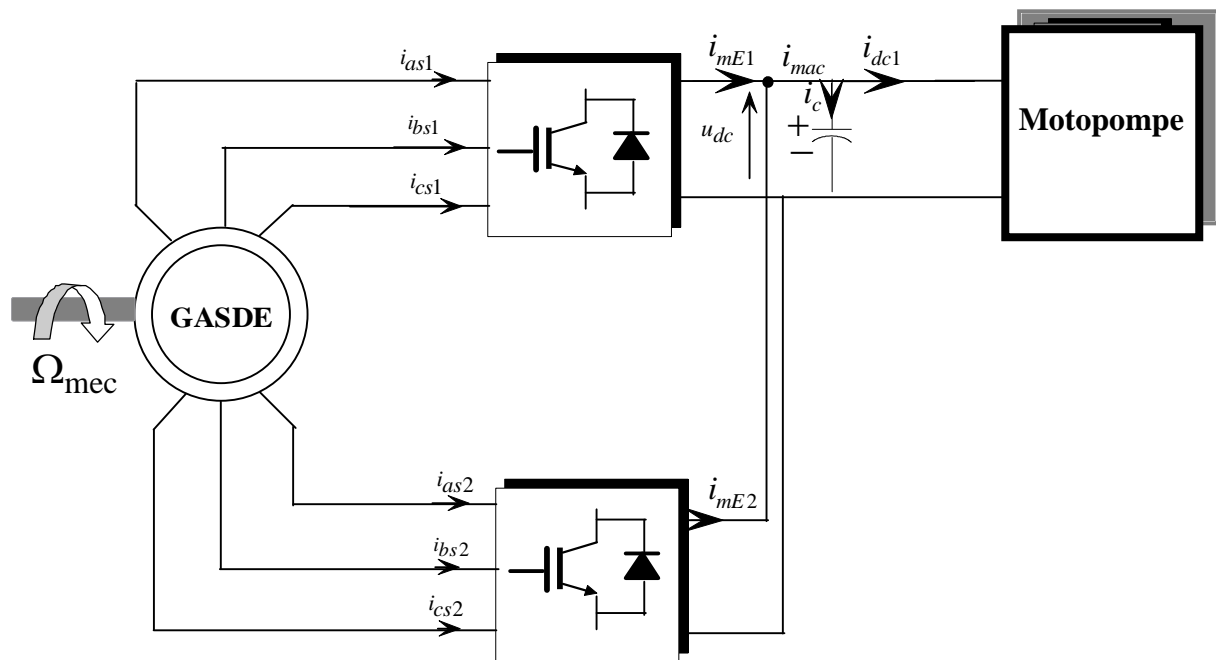


Figure VI. 5 : Schéma global du système étudié

Pour simuler notre système nous avons choisi une vitesse d'entraînement fixe

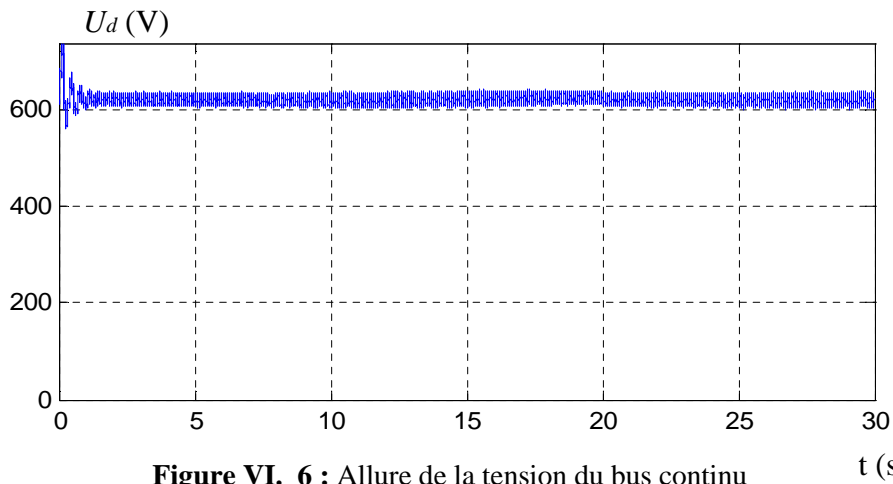


Figure VI. 6 : Allure de la tension du bus continu

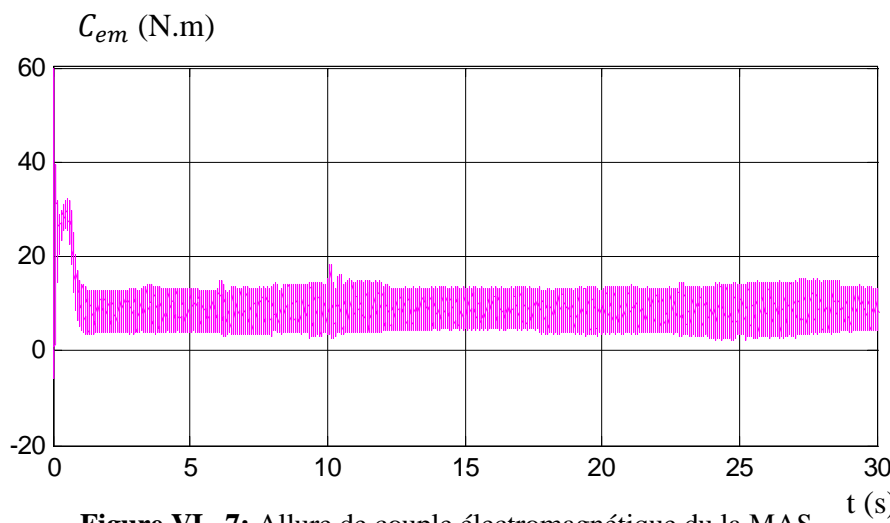


Figure VI. 7: Allure de couple électromagnétique du la MAS

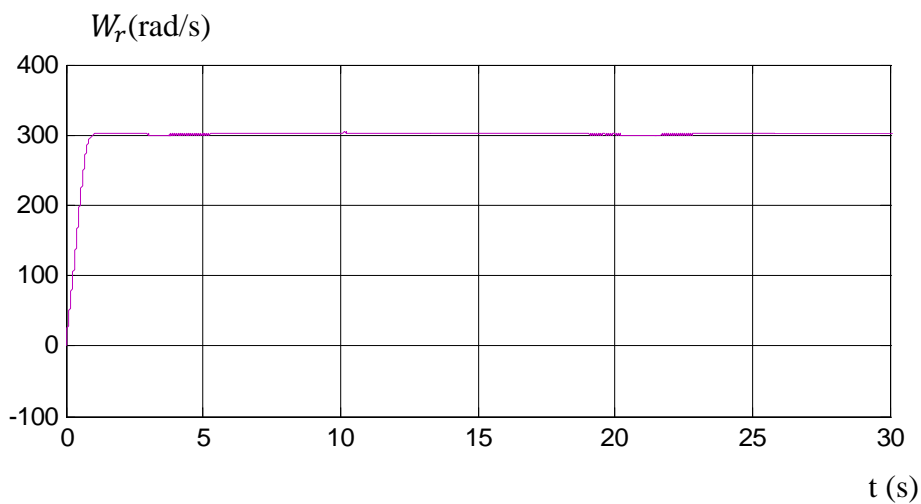


Figure VI. 8: Allure de la vitesse de rotation du MAS

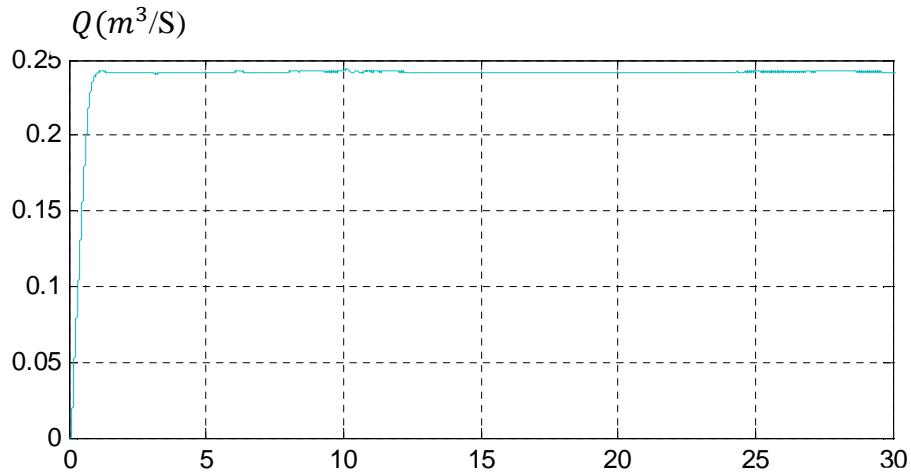


Figure VI. 9: Allure du débit d'eau t (s)

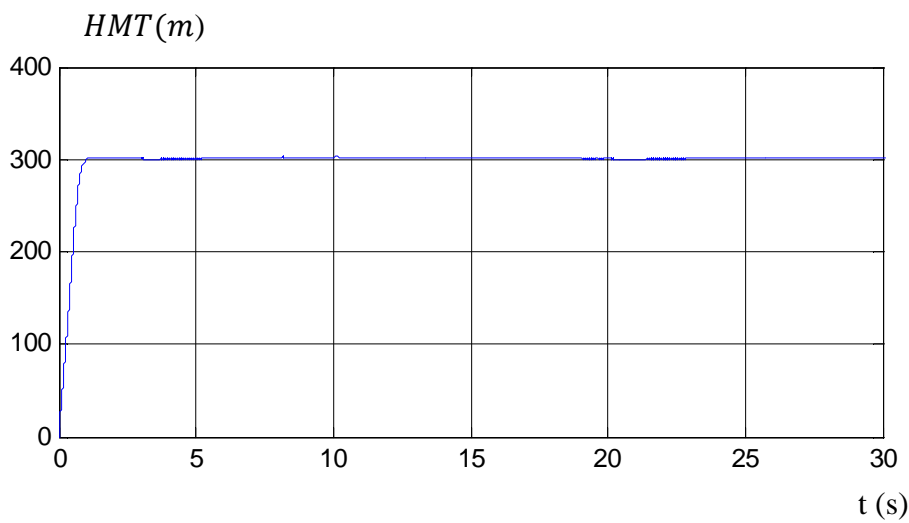


Figure VI. 10: Allure de la hauteur manométrique

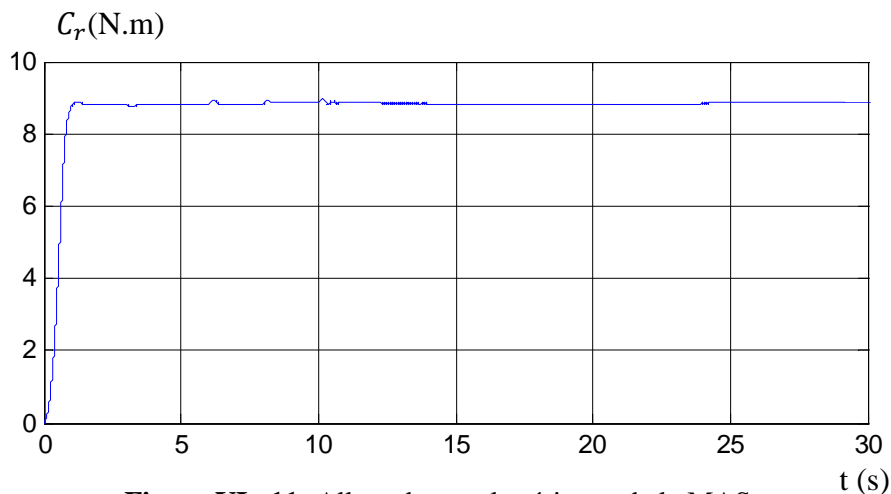


Figure VI. 11: Allure de couple résistant de la MAS t (s)

IV.6 Interprétation des résultats de simulation

La vitesse d'entraînement est représentée par une vitesse d'entraînement fixe avec une valeur de la tension redressée de référence $U_{dc}^* = 622V$ pendant toute la durée de simulation.

Les résultats de simulation montrent que la tension de bus continu suit sa référence comme elle est montrée dans la figure(VI.7).

La vitesse de rotation de la MAS augmente rapidement jusqu'à atteindre une valeur 300 rad/s correspondant à 2864 tr/min, figure (VI.9).

Les figures (VI.8, VI.10 VI.12) représentent les allures de, couple électromagnétique, du débit délivré par la pompe, et du couple résistant respectivement, on remarque que le couple résistant augmente très rapidement en fonction de la vitesse de rotation, après le démarrage le couple électromagnétique de la MAS oscille autour d'une valeur de 30N.m avant que le couple résistant qui est proportionnel au carré de la vitesse de rotation se coïncide autour d'une valeur de 10 N.m après un laps de temps « 0.8s », le débit évolue de la même manière que l'évolution de la hauteur manométrique total, et qui est semblable à l'allure de la vitesse de rotation, le débit augmente et atteint $0.24m^3/s$ au bout de 0.8s.

IV.7 Conclusion

Ce chapitre est dédié à l'application et dimensionnement du système de pompage éolien dont on a présenté les étapes nécessaires pour le dimensionnement, puis nous avons déterminé la puissance de la GASDE capable de fournir l'énergie nécessaire pour alimenter la charge représentée par le motopompe, Après nous avons simulé les différents grandeurs du système de pompage.

Finalement on a donné les résultats de simulation et leurs interprétations. On a constaté que le débit reste constant et cela est dû au bus continu constant qui est dû à la robustesse de la commande vectorielle.



conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'utilisation des énergies renouvelables pour différentes application tel que le pompage d'eau présent un intérêt très important.

Le but de travaille présenté dans ce mémoire est consacré d'une façon générale à l'étude et la modélisation puis la simulation d'un système de pompage à partir d'une ressource renouvelable (énergie éolienne).

Dans le première chapitre de ce travaille nous avons présenté les déférents sources d'énergies renouvelables, puis nous avons concentré sur l'énergie éolienne ainsi que les déférents technologies des éoliennes, et les déférents composants constituant l'aérogénérateur leur fonctionnement et leur avantages et inconvénients, ensuit on a présenté quelques machines utilisées dans la chaine de conversion d'énergie éolienne, dans notre travaille, on a opté pour le choix de la génératrice asynchrone à double étoile.

Le seconde chapitres est consacré à la modélisation des déférents partie de la machine asynchrone à double étoile associé à des convertisseurs de tension a commandé MLI, dont la complexité a été réduit en utilisant certaine nombre d'hypothèse simplificatrices, par l'application de la transformation de Park, la simulation a été réalisée sous le logiciel Matlab/Simulink, les résultats de simulation traduit un bon fonctionnement de la MASDE.

Le troisième chapitre est divisé en deux partie, premièrement notre étude est consacré à la modélisation des déférent partie de conversion d'énergie éolienne, on commençant par la partie mécanique qui est la turbine, constitué des pales, du multiplicateur de vitesse et de l'arbre . La seconde partie est dédiée au contrôle de GASDE par la commande vectorielle par orientation de flux rotorique, nous avons appliqué la commande indirecte avec régulation de bus continu pour mieux mettre en évidence les caractéristiques de la commande sur la GASDE.

Le quatrième chapitre de ce mémoire a été consacré au dimensionnement et la simulation du système de pompage éolien, dans un première tempe nous avons déterminé la puissance de la GASDE désire pour alimenter le groupe motopompe ensuite une simulation de l'ensemble de système de pompage effectuée sous le logiciel Matlab/Simulink,

.Les résultats de simulation ont été interpréter et commenté.

A partir des résultats obtenus nous pouvons tirer les perspectives suivantes pour la continuité de ce travail à savoir :

- Application d'une commande non linéaire comme la commande en mode glissant.
- Application de nouvelles stratégies de commande pour l'obtention de la puissance maximal MPPT de l'éolienne.
- Etude du régime dégradé pour la machine à double étoile.
- l'optimisation technique et économique de la chaine de conversion.

Références bibliographies

- [1] : O.fedaoui, « contribution à l'étude des systèmes hybride de génération, Application aux énergies renouvelable>>, Mémoire de magister, université de souk-ahras
- [2] : A.Lilia, « contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliens », thèse de doctorat, université Batna, 2012.
- [3] : Y.Djeriri, « commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien », Mémoire de magister en électrotechnique, décembre 2009.
- [4] : K.Idjdarene, « Gisement éolien» cours premier année master énergie renouvelable, université de Bejaïa,2020
- [5] : Y. Djeriri, « commande par Réseaux de Neurones d'une MADA Intégré à un système éolien », Mémoire de magister, université de sidi bel-abbes, 2009.
- [6] : B. toual, « Modélisation et commande floue d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable »,Mémoire magister, université de Batna, 2010.
- [7] : L.Youssef, « calcul du rendement de l'éolienne Rentable 913 à l'aide du logiciel Mecaflux Héliciel », Mémoire de master, université Agadir, 2017.
- [8] : A.Boyette, « contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, université Nancy, 2006.
- [9] : K.Rahrah, « Intégration des énergies renouvelables aux réseaux », cour master académique, université de Bejaïa, 2020.
- [10] : A.Mireki, « Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées a une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, université de Lille, 2005.
- [11] : N.Cherfia, « Etude d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne », thèse de doctorat, université de constantine, 2008.
- [12] : C.Chazallon, « conception d'éoliennes », INSA de starsburg-rizzo anier, Mémoire d'ingénieur, 2008.
- [13] : S. Chekkal, « Intégration des génératrices asynchrones à double étoiles dans un système éolien», thèse de doctorat de l'université de Bejaïa, 2015.
- [14] : M. Ahmed, « simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne », Mémoire de Magister, université Sétif, 2011.
- [15] : K.Idjdarene, « contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », Thèse de doctorat, université de béjaia, 2010.
-

Références bibliographiques

- [16] : H. Amimeur, « contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile par mode de glissement », Mémoire de Magister, université de batna, 2008.
- [17] : A. Djaborebi, « Etude et commande d'une machine asynchrone double étoile », Mémoire master, université de ouaregla, 2006.
- [18] : M. Alkama, « stockage de l'énergie et pile à combustible », cours master énergie renouvelable université de Bejaïa.
- [19] : K. Hamitouche, « contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne de traction ferroviaire », Mémoire de magister, université de Bejaïa, 2013.
- [20] : K. Ouari, « Modélisation et stratégie de commande de la machine asynchrone triphasé », cours master 1 électrotechnique, université de Bejaïa, 2015.
- [21] : L. Zarour laid « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Mémoire de Magister, université de constantine, 2010.
- [22] : O. Geraude, « Modélisation Energétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat, décembre 2002.
- [23] : A.Tamaarat, « modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA », thèse de doctorat, université de Biskra, décembre 2015.
- [24] : K.Ameur, www.cder.dz .
- [25] : M. Chdel, « Dimensionnement pour pompage d'eau potable pour les sites de tlemcen et adrar »Mémoire de Master, université de tlemcen, 2012.
- [26] : KY Thierry S.Maurice, « système photovoltaique, dédimensionemnt pour pompage d'eau pour une irrization goutte-à-goute », Mémoire DEA, université de ouagadougou, fevrier 2007.
- [27] : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/> .
- [28] : M. Lamine Doumbia, « Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel Matlab/simulink ».
- [29] : S. Chekkal, « Evaluation des performances de l'aérogénérateur à base de la machine asynchrone double étoile connecté au réseau électrique », Mémoire de magister, université de Bejaïa, 2011.
- [30] : Ahmed Mehdi. Othmani, « commande vectorielle d'une machine asynchrone associée à un observateur adaptatif », Mémoire de Master, université Annaba, 2019.
- [31] :B. Boussiala, « commande vectorielle d'une machine asynchrone polyphasée alimentée par onduleur à trois niveau 'application sur la machine Heptaphasée' », Mémoire de magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger, 2010.
-

Références bibliographiques

- [32] : G.o ; Z.S ; K. bilal, « étude d'une machine asynchrone dédiée à un système de pompage photovoltaïque », mémoire de Master, université Bejaïa, 2020.
- [33] : S. Benhalima, « Modélisation et contrôle des systèmes éoliens-solaire, Intégration réseau VSC-HVDC », thèse de doctorat, Montréal, 2019.
- [34] : R. Chedid and S.Rahman, « Unit sizing and control oh hybrid wide-solar power système », IEEE transaction on energy conversion, vol. 12, No.1, 1997.
- [35] : M. Lakhdari, « simulation et commande de la machine asynchrone double étoile pour aérogénérateur », mémoire de magister, université Sétif-1, 2014.
-



Annexes

Annexe

Annexe 1 : paramètre de MASDE

- 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 $P = 1$
- Gains proportionnels et intégraux des régulateurs PI la tension de bus continu
 $K_p = 40$, $K_i = 360$

Annexe 2 : paramètre de la machine asynchrone à cage d'écurueil

- Puissance nominale $P_n = 4 \text{ KW}$
- Tension nominale $V_n = 220 \text{ V}$
- Courant nominale $I_n = 15 \text{ A}$
- Vitesse nominale $N_n = 1500 \text{ tr/min}$
- Résistance statorique $R_s = 4.85 \Omega$
- Résistance rotorique $R_r = 3.805 \Omega$
- Inductance cyclique statorique $L_s = 0.274 \text{ H}$
- Inductance cyclique rotorique $L_s = 0.274 \text{ H}$
- Inductance cyclique mutuel $M = 0.258 \text{ H}$
- Le moment d'inertie $J = 0.031 \text{ kg.m}^2$
- Coefficient de frottement $f = 0.0001 \text{ N.m.s /rad}$

Annexe 3 : paramètre de la pompe centrifuge

- $a_0 = 4.9234.10^{-3} \text{ m/(rad/s)}^2$.
-

Annexe

- $a_1 = 1.5825 \cdot 10^{-5} m / ((rad/s) \cdot (m^2/s))$.
- $a_2 = -18144 m / (m^3/s)^2$.

Annexe 4 : les différents schéma bloc de simulation

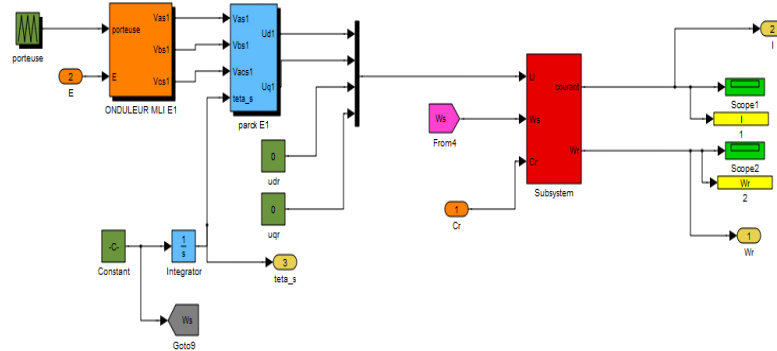


Figure 1 : schéma bloc de machine asynchrone à cage d'écuruil

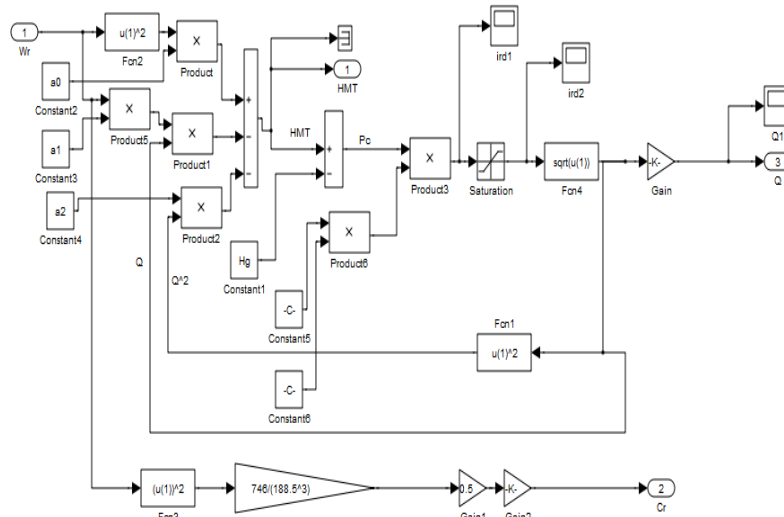


Figure 2 : schéma bloc de la pompe centrifuge

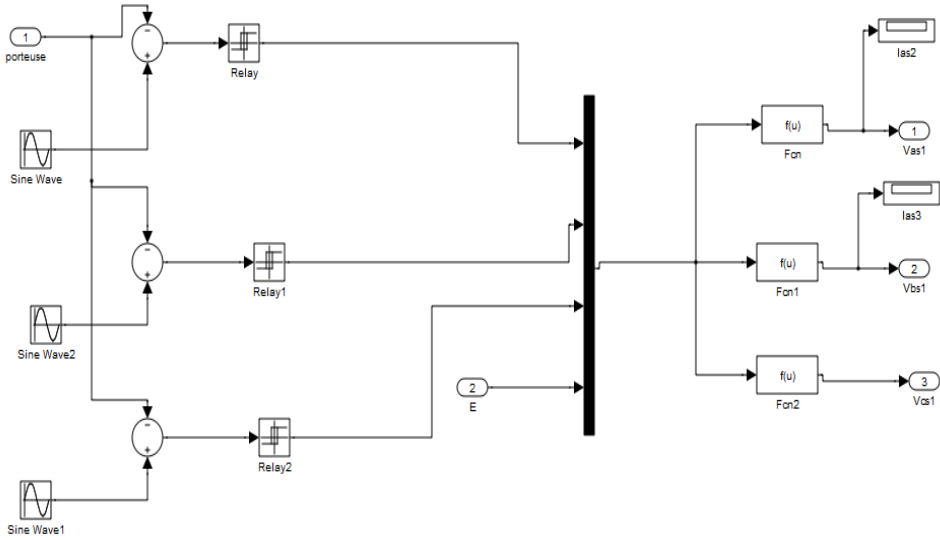


Figure 3 : schéma bloc de l'onduleur