

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Par : DJEBBAR Omar & TEKKI Mohammed

Sujet :

**Étude et simulation d'un aérogénérateur
à base d'une MADA**

Soutenu publiquement, le 18 /09 / 2019, devant le jury composé de :

Mr. S.M.MELIANI	M.C.A	Univ. Tlemcen	Président
Mr. M.A.BRIKCI NIGASSA	M.A.A	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire Mr.
M.LOUCIF	M.C.B	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire 2018/2019

DÉDICACES

Je dédie ce travail :

Pour le plus cher que j'ai dans la vie, mes chers parents,

Mes chères sœurs qui m'ont apporté le soutien nécessaire pour
accomplir ce travail

A la famille de MEHAYA et SELLAMI

A toutes mes amis de la promotion master 2 Génie électrique,

option Commande Machine 2019

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé, je dis merci beaucoup

Etudiant TEKKI Mohammed

DÉDICACES

Je dédie ce travail :

Pour le plus cher que j'ai dans la vie, mes chers parents,

Mes chères sœurs qui m'ont apporté le soutien nécessaire pour
accomplir ce travail

A la famille de DJEBBAR et BERRAYAH

A toutes mes amis de la promotion master 2 Génie électrique,

Option Commande machine 2019

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé, je dis merci beaucoup

Etudiant DJEBBAR Omar

REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier Mr. Mohammed Amine BRIKCI NIGASSA,
Maitre-assistant à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté la
supervision de nos travaux.

Nous exprimons nos sincères remerciements à Mr. S. M. MELIANI
Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, a accepté la
présidence du jury.

Nous remercions le membre du jury, Messieurs, et M. LOUCIF Maitre
de conférences à l'Université Tlemcen.

Sommaire

Introduction Générale

Chapitre I :

Etude et simulation d'une turbine

I.1	Introduction	7
I.2	Modélisation de vent	7
I.3	Loi Betz	10
I.4	Modèle de la turbine	12
I.4.1	Coefficient de puissance	13
I.4.2	Puissance aérodynamique	13
I.4.3	Vitesse relative	13

I.5	Modèle du multiplicateur	14
I.6	Modélisation de L'éolienne a deux masses	14
I.6.1	Modèle dynamique de la première masse et la deuxième masse	16
I.6.2	Modèle de multiplicateur	16
I.7	Modélisation de L'éolienne a une masse	16
I.7.1	Modèle a une masse ramenée sur l'arbre lent	17
I.7.2	Modèle a une masse ramenée sur l'arbre rapide	18
I.8	zones de fonctionnement d'une éolienne	19
I.9	Technique d'extraction de maximum de puissance	20
I.9.1	Commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation	21
I.10	Synthèse du régulateur	21
I.10.1	Régulateur PI	21
I.11	Résultats de simulation	23
I.11.1	Modelé de la simulation	23
I.11.2	Interprétations des résultats	24
I.12	Conclusion	27

Chapitre II :

Etude et simulation d'une génératrice à double alimentation

II.1	Introduction	29
II.2	Structure d'une MADA	29
II.3	Modélisation de la MADA	30
II.3.1	Principe de fonctionnement de la MADA	30
II.3.2	Mode Moteur Hypo-Synchrone	30
II.3.3	Mode Moteur Hyper-Synchrone	31
II.3.4	Mode Générateur Hypo-Synchrone	31
II.3.5	Mode Générateur Hyper-Synchrone	32
II.4	Avantages et inconvénients de la MADA	32
II.4.1	Avantages de la MADA	32
II.4.2	Inconvénients de la MADA	33
II.5	Modélisation de la machine à double alimentation	33
II.5.1	transformation de PARK	33

II.5.2	Equations magnétiques	34	
II.5.3	Couple électromagnétique	35	
II.5.4	Equation mécanique	36	
II.5.5	Equation de Park	36	II.6
	Modélisation du redresseur	37	
II.7	Modélisation de l'onduleur de tension	38	
II.7.1	Le Transistor IGBT	38	
II.7.2	Principe de fonctionnement	38	
II.8	Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	40	
II.8.1	Equation de la référence	41	
II.8.2	Equation de la porteuse	41	
II.9	Bus continu	42	
II.10	Circuit RL série	43	
II.11	Rappel sur le modèle de la MADA	43	
II.12	Technique d'orientation du flux	43	
II.13	La commande directe	46	
II.14	Commande du convertisseur cote réseau.....	46	
II.15	Synthèse du régulateur.....	47	II.15.1
	Régulateur PI.....	47	
II.16	Résultats de simulation.....	48	
II.16.1	Interprétations des résultats.....	49	
II.17	Conclusion.....	52	

Chapitre III

III.1	Régulateur PI neuronal.....	54	
III.1.1	Introduction	54	
III.1.2	Neurone formel	54	
III.1.3	Architecture de réseaux de neurone.....	55	
III.1.4	Réseau dynamique	55	
III.1.5	Réseaux statiques.....	56	
III.1.6	Apprentissage des réseaux de neurones	56	
III.1.7	Type d'apprentissage	57	III.2. La
	commande H_{∞}	60	
III.2.1	Introduction	60	

III.2.2	La norme H^∞	60	III.2.3
	Problème standard	60	
III.3.	Synthèse du correcteur robuste H^∞	61	
III.4.	L'équation de Riccati	62	
III.5.	Mise en œuvre	62	
III.5.1	Mise en forme pour la synthèse	62	
III.5.2	Mise en œuvre par l'introduction de fonctions de pondération.....	63	
III.6	Résultats de simulation	64	
III.7	Conclusion.....	68	

Liste des figures

Chapitre I

Figure .1 :	Capacité d'énergie éolienne dans le monde en 2017.....	2
Figure .2 :	éoliennes à axe vertical.....	4
Figure .3 :	éoliennes à axe horizontal.....	4
Figure .4 :	Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne..	5
Figure I.1 :	La vitesse de vent en fonction de temps [Nichita].....	9
Figure I.2 :	la vitesse de vent en fonction de temps [Van Der Hoven].....	9
Figure I.3 :	tube de courant d'aire autour d'une turbine éolienne	10
Figure I.4 :	coefficient de puissance	11
Figure I.5 :	coefficient de puissance pour différent type d'éolienne	12
Figure I.6 :	courbes de C_p en fonction de (λ, β)	14

Figure I.7 :	Schéma du dispositif d'entraînement à deux masses.....	15
Figure I.8 :	Modèle à une masse du dispositif d'entraînement ramené sur l'arbre lent	17
Figure I.9	Modèle à une masse du dispositif d'entraînement ramené sur l'arbre rapide	18
Figure I.10 :	diagramme des zones de fonctionnement d'une éolienne.....	19
Figure I.11:	Schéma bloc de la commande MPPT ave asservissement.....	22
Figure I.12 :	Boucle de régulation de la vitesse mécanique.....	22
Figure I.13 :	Vitesse de vent (m/s).	24
Figure I.14:	Vitesse relative (m/s).	24
Figure I.15:	Coefficient de puissance C_p	25
Figure I.16:	Vitesse mécanique (rad/s).....	25
Figure I.17:	vitesse de la génératrice (rad/s).	25
Figure I.18:	Couple mécanique (Nm)	26
Figure I.19:	Couple aérodynamique (Nm).....	26
Figure I.20:	puissance aérodynamique (w).....	26
Figure I.21:	angle de calage (degré).....	27

Chapitre II

Figure II.1:	Structure de rotor	29
Figure II.2:	Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.....	30
Figure II.3 :	Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	30
Figure II.4 :	Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	31
Figure II.5 :	Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	31
Figure II.6 :	Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	32
Figure II.7 :	Représentation de la MADA dans le système triphasé.....	33
Figure II.8 :	Représentation du redresseur triphasé à diodes.....	37
Figure II. .9:	Symbole usuel de l'IGBT.....	38

Figure II.10:	Structure d'un onduleur de tension.....	39
Figure II.11:	Principe de la commande MLI- sinus-triangle.....	41
Figure II.12:	Modèle considéré pour dimensionner le bus	42
Figure II.13:	Schéma électrique du bus continu.....	42
Figure II.14:	Filtre RL série.....	43
Figure II.15:	Orientation de l'axe d sur le flux statoriques.....	44
Figure II.16:	Schéma bloc du système à commander.....	45
Figure II.17:	Schéma bloc de la commande directe de la MADA	46
Figure II.18:	Connexion du CCR réseau.....	47
Figure II.19:	Boucle de régulation de la vitesse mécanique.....	47
Figure II.20:	modèle de simulation de notre MADA.....	48
Figure II.21:	Puissance active (Watt) avec régulateur PI.....	49
Figure II.22:	Puissance réactive Q (VAR) avec régulateur PI.....	49
Figure II.23:	Le couple électromagnétique T_{em} (N.m) avec régulateur PI.....	50
Figure II.24:	La vitesse (rad/s) avec régulateur PI.....	50
Figure II.25:	Courants statoriques I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} (A) avec régulateur PI.....	51
Figure II.26:	Courants rotorique I_{ra} , I_{rb} , I_{rc} (A) avec régulateur PI.....	51
Figure II.27:	Zoom courants rotorique.....	52

Chapitre III

Figure II.1 :	Modèle du neurone formel de Mac Culloch et Pitts avecbiais.....	54
Figure III.2 :	Différents types de fonctions d'activation.....	55
Figure III.3 :	Représentation d'un Réseau de neurones non bouclés[3].....	56
Figure III.4 :	Représentation d'un Réseaux de neurones bouclés.....	56
Figure III.5 :	Structure de perceptron multicouche	58
Figure III.6 :	Le problème standard H_{∞}	60

Figure III.7 :	Analyse d'un système asservi [13].	63
Figure III.8 :	Diagramme de block simplifié de plant augmenté.....	63
Figure III.9 :	Puissance active (Watt)	64
Figure III.10 :	Zoom puissance active t=6 s.....	64
Figure III.11 :	Zoom puissance active t=4 s.....	64
Figure III.12 :	Puissance réactive.....	65
Figure III.13 :	Zoom puissance réactive.....	65
Figure III.14 :	Couple électromagnétique.....	65
Figure III.15 :	Zoom couple électromagnétique a t=6 s.....	66
Figure III.16 :	Zoom couple électromagnétique a t=4 s.....	66
Figure III.17 :	La vitesse.....	66
Figure III.18 :	Courants statoriques.....	67
Figure III.19 :	Courants rotorique.....	67

Liste des tableaux

Tableau II.1. Calcul les vecteurs des tensions

Liste des symboles et abréviations

Nomenclature

Les principales notations utilisées dans cette thèse sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

Grandeurs électriques et mécanique

Nom	Symbole	[]
-----	---------	-----

<i>Couple électromagnétique</i>	<i>TTTTTT</i>	Nm
<i>Couple résistance</i>	<i>TTTT</i>	Nm
<i>Courant</i>	<i>I</i>	A
<i>Facteur de puissance</i>	<i>ccccc</i>	/
<i>Fréquence</i>	<i>ff</i>	Hz
<i>Flux magnétique</i>	$\phi\phi$	W _b
<i>Induction magnétique</i>	<i>BB</i>	T
<i>Puissance active statorique</i>	<i>PPcc</i>	W
<i>Puissance réactive statorique</i>	<i>QQcc</i>	VAR
<i>Pulsation électrique</i>	ω	rad/s
<i>Pulsation mécanique de rotation</i>	Ω	rad/s
<i>Temps</i>	<i>tt</i>	s
<i>Tension</i>	<i>VV</i>	V

Paramètres de modélisation du moteur asynchrone a double alimentation

Nom	Symbole
<i>résistances statoriques</i>	<i>RRcc</i>
<i>résistances rotoriques</i>	<i>RRTT</i>
<i>Inductance cyclique statorique</i>	<i>LLcc</i>
<i>Inductance cyclique rotorique</i>	<i>LLTT</i>
<i>Inductance cyclique mutuelle(entre stator et rotor),</i>	<i>MM</i>
<i>Inductance de fuite statorique</i>	<i>LLcc</i>
<i>Inductance de fuite rotorique coefficient</i>	<i>LLTT</i>
<i>de dispersion ou (de Blondel),</i>	
<i>nombre de paires de pôles, Moment</i>	$\sigma\sigma$
<i>d'inertie (Kg. m2)</i>	<i>pp</i>
<i>Coefficient de frottements visqueux (Nm.s.rad-1),</i>	<i>JJ</i>
<i>couple électromagnétique. Transformation de</i>	<i>kk</i>
<i>Park inverse Transformation de Park directe</i>	<i>TTTTTT</i>
<i>couple de charge,</i>	<i>PP[$\theta\theta$] -</i>
<i>Coefficients de proportionnalité et d'intégration</i>	<i>1</i>
	<i>PP[$\theta\theta$]</i>
	<i>TTTT</i>
	<i>KKpp,</i>
	<i>KKii</i>

Repère

Nom	Symbole
-----	---------

<i>Axes liés aux enroulements triphasés statoriques</i>	aa_{ss}
<i>Axes liés aux enroulements triphasés rotoriques</i>	$bb_{ss}cc_{ss}$
<i>Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme)</i>	$aa_{rr} bb_{rr}$
<i>Axes de référentiel de Park (fixe au stator) position angulaire du rotor par rapport au stator, position angulaire du stator par rapport à l'axe (d) position angulaire du rotor par rapport à l'axe (q)</i>	cc_{rr} (dd, qq) $(\alpha\alpha, \beta\beta)$ $\theta\theta$ $\theta\theta_{cc}$ $\theta\theta_{TT}$

Grandeurs électriques au stator

Nom	Symbole
<i>tensions statoriques triphasées,</i>	$VV_{ccaa},$
<i>vecteur des tensions statoriques triphasées tensions</i>	$VV_{ccbb},$
<i>statoriques diphasées dans le repère $(\alpha\alpha, \beta\beta)$</i>	VV_{cccc}
<i>Vecteur des tensions statoriques diphasées dans le repère $(\alpha\alpha, \beta\beta)$</i>	$VV_{cc},$
<i>Vecteur des tensions statoriques diphasées dans le repère (d,q)</i>	$aabb_{cc}$
<i>courants statoriques triphasés,</i>	$VV_{cc\alpha\alpha},$
<i>Vecteur des courants statoriques triphasés,</i>	$VV_{cc\beta\beta}$
<i>Vecteur des courants statoriques diphasés dans le repère</i>	$VV_{cc},$
<i>Vecteur des courants statoriques diphasés dans le repère tournant</i>	$VV_{\alpha\alpha\beta\beta}$ $VV_{ddcc},$ VV_{qqcc} $ii_{ccaa},$ $ii_{ccbb},$ ii_{cccc} $ii_{cc}, aabb_{cc}$ $ii_{cc\alpha\alpha},$ $ii_{cc\beta\beta}$ $ii_{ddcc},$ ii_{qqcc}

Grandeurs électriques au rotor

Nom	Symbole
<i>tensions rotoriques triphasées,</i>	$VV'_{TTaa},$
<i>Vecteur des tensions rotoriques diphasées dans le repère $(\alpha\alpha, \beta\beta)$</i>	$VV'_{TTbb},$
<i>Vecteur des tensions rotoriques diphasées dans le repère, (d,q)</i>	VV'_{TTcc}
<i>courants rotoriques triphasés,</i>	$VV'_{TT\alpha\alpha},$
<i>Vecteur courants rotoriques diphasés dans le repère $(\alpha\alpha, \beta\beta)$</i>	$VV_{TT\beta\beta}$
<i>Vecteur des courants rotoriques diphasés dans le repère tournant</i>	$VV'_{ddTT},$ VV'_{qqTT}

	$i_i' T T a a,$ $i_i' T T b b,$ $i_i' T T c c$ $i_i' T T \alpha \alpha,$ $i_i' T T \beta \beta$ $i_i' d d T T,$ $i_i' q q T T$
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Grandeurs magnétiques au stator

Nom	Symbole
<i>Vecteur de flux magnétiques au stator, flux statoriques diphasés dans le repère $(\alpha\alpha, \beta\beta)$</i>	$\Psi_{ss}(aa, bb, cc)$
<i>Vecteur de flux statoriques diphasés dans le repère tournant (d,q)</i>	Ψ_{ssss}, Ψ_{ssss}
	Ψ_{ssss}, Ψ_{ssss}

Grandeurs magnétiques au rotor

Nom	Symbole
<i>Vecteur de flux magnétiques au rotor, Vecteur de flux rotorique diphasés dans le repère $(\alpha\alpha, \beta\beta)$</i>	$\Psi_{rr}(aa, bb, cc)$
<i>Vecteur de flux rotorique diphasés dans le repère tournant (d,q)</i>	Ψ_{rrss}, Ψ_{rrss}
	Ψ_{rrss}, Ψ_{rrss}

Grandeurs mécaniques de la turbine

Nom	Symbole
<i>Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation</i>	$\omega\omega$
<i>Pulsation électrique des grandeurs statoriques</i>	$\omega\omega_{ss}$
<i>Pulsation électrique des grandeurs rotorique</i>	$\omega\omega_{rr}$
<i>Glissement de la vitesse de rotation</i>	$\omega\omega_{gg}$
<i>Fréquence électrique des grandeurs statorique</i>	$g g$
<i>Fréquence électrique des grandeurs rotorique</i>	$f f_{ss}$
<i>Vitesse mécanique de rotation vitesse mécanique de rotation</i>	$f f_{rr}$
	$\Omega\Omega$
	$N N$

Grandeurs mécaniques de la turbine

Nom	Symbole	
<i>Angle d'orientation des pales</i>	$\beta\beta$	$ddTTdd^\circ$
<i>Couple aérogénérateur</i>	$TTaaTTTT$	$NNTT$
<i>Coefficient de puissance</i>	$CCpp$	—
<i>Coefficient de puissance maximale</i>	$CCppmax$	—
<i>Gain du multiplicateur</i>	GG	—
<i>Masse volumique de l'air</i>	$\rho\rho$	—
<i>Puissance aérogénérateur</i>	$PPaaTTTT$	WW
<i>Rayon de pale</i>	RR	TT
<i>Vitesse du vent</i>	$VVVVTTVVtt$	TT/cc
<i>Vitesse relative</i>	$\lambda\lambda$	—
<i>Vitesse relative optimal</i>	$\lambda\lambda cc pp tt$	—

Glossaire

Acronyme	Signification
CV	Commande Vectorielle
CCM	Convertisseur Côté Machine
CCR	Convertisseur Côté Réseau
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Régulateur Proportionnel et Intégral
PWM	Pulse Width Modulation
AG	Algorithme Genetique
FTBO	Fonction de Transfert Boucle Ouverte
FTBF	Fonction de Transfert Boucle Fermée

Introduction
Générale

Introduction générale :

Sachant que plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, obtenue au fil des âges et de l'évolution géologique, cependant celle qui repose sur les énergies renouvelables ne représentent que 15% de la consommation énergétique en 2011 [01].

L'énergie éolienne dans le monde.

Le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelable (solaire, hydraulique, géothermique et éolienne) a connu une augmentation sans cesse ces dernières années surtout dans les pays développés comme la Chine qui est le premier du monde suivi par les États-Unis et l'Allemagne.

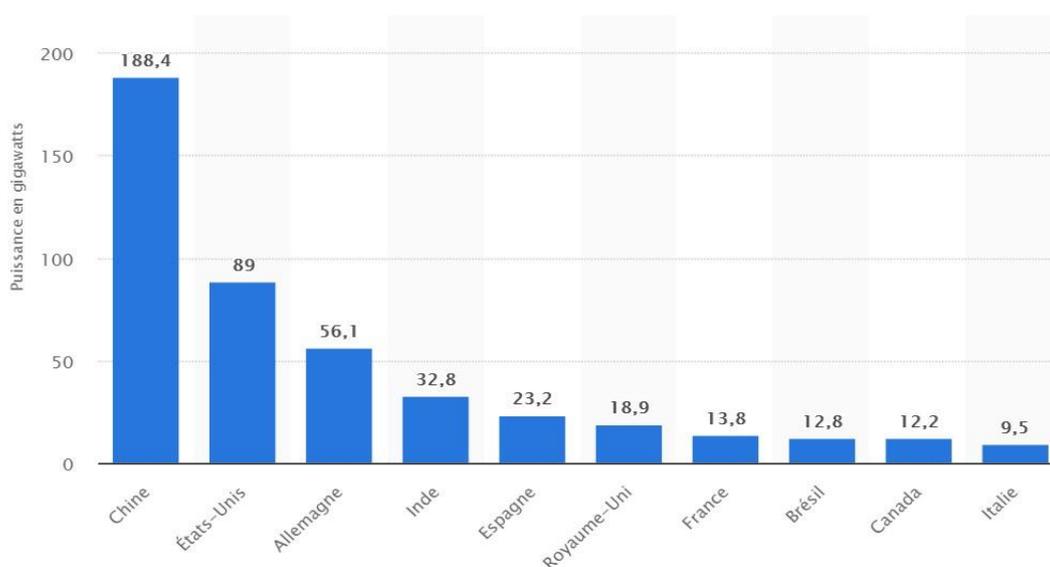


Figure1. Capacité d'énergie éolienne dans le monde en 2017 [01].

Ce graphique représente la capacité en énergie éolienne dans le monde en 2017, selon le pays et en gigawatts. On peut ainsi constater que la capacité en énergie éolienne de la Chine s'établissait à environ 188 gigawatts en 2017, plus que dans tout autre pays du monde à ce temps-là. Les États-Unis obtenaient la deuxième place du classement, disposant d'une capacité en énergie éolienne de près de 90 gigawatts en 2017. **L'énergie éolienne en Algérie [06] :**

L'Algérie, accuse un retard important dans la course aux énergies renouvelables, bien qu'un programme gouvernemental ait été élaboré dans le plan d'action '2011-2030',

Dans l'objectif d'installation d'une puissance de 5.1 GW de source éolienne [02]. A ce jour, une première et 'unique' ferme éolienne de 10MW a été installée dans la wilaya d'Adrar.

Il est cependant à noter que les tentatives de l'exploitation de l'énergie éolienne dans le territoire national ne datent pas d'hier. En effet, l'analyse d'un ensemble de comptes rendu et D'archives provenant du comité d'énergie du vent du service d'Hydraulique a montré que plusieurs essais ont été menés entre 1930 et 1974 dans l'objectif de promouvoir l'utilisation de l'énergie éolienne et ce pour la production électrique ou pour le pompage.

Les premiers travaux étaient liés à la prospection des sites favorables à l'installation d'aérogénérateurs. En effet, un premier atlas a été établi en 1930 par P. Seltzer [03] dans une étude climatologique de l'Algérie comparant un ensemble de 57 stations de mesure de données de vent, de température, de pression atmosphérique et de précipitations.

En 1951 le comité de l'énergie des vents départemental d'Alger [04], en collaboration avec M. Medinger [05], ont lancé des campagnes de mesures sur le potentiel éolien pour les stations de Bakhadda (Tiaret), Bugeaut (Annaba), Ain Skhoua (Saida), Boughzoul, in Temouchent, Tadjemout (Laghouat), Cap Carbon, Tébessa et Biskra. Avec une puissance de 1130Kwh/m², de 1000Kwh/m² et de 800Kwh/m² enregistrées dans les trois premiers sites respectivement, ces derniers ont été, déjà définis comme des sites intéressants en termes de potentiel éolien. Il a été aussi prévu d'étendre les mesures à une vingtaine de stations estimées potentiellement intéressantes, telles que Adrar, Cap Ténès, Chenoua, Akbou, la Soummam, Ain Mlila et Khenchela.

Nous nous intéresserons à l'éolien, c'est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, laquelle est ensuite le plus souvent transformée en énergie électrique, appelée énergie éolienne. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage ou pompe à vent. Une forme ancienne d'éolienne est le moulin à vent.

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des capteurs éoliens (aéromoteurs) a connu une évolution considérable surtout ces dernières décennies ; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent, et leurs structures sont de plus en plus performantes. Nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

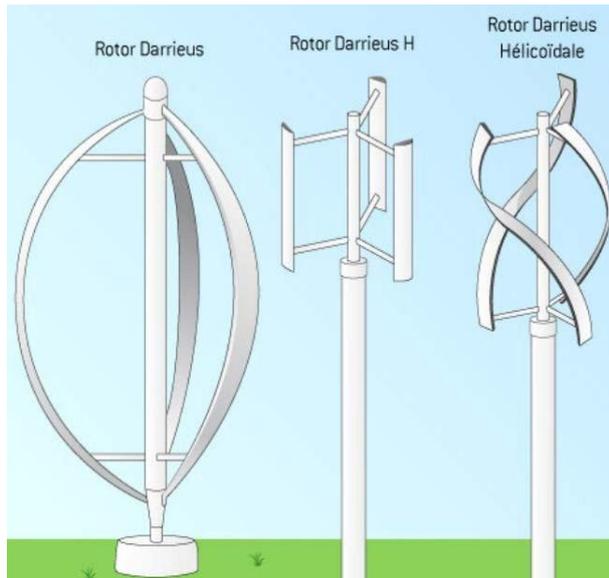


Figure2 .éoliennes à axe vertical

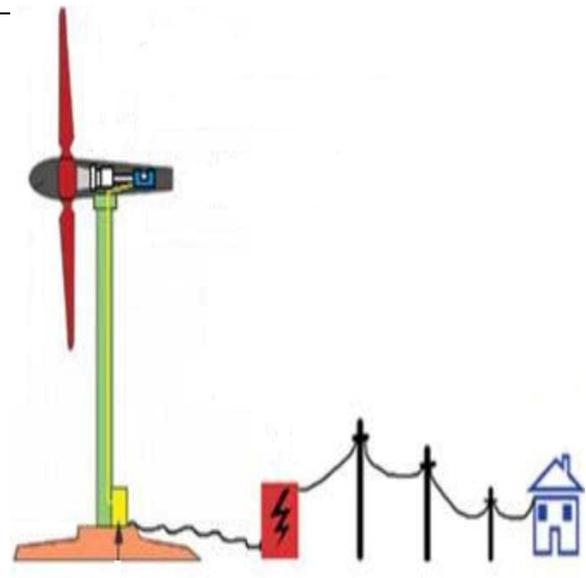


Figure3. Éoliennes à axe horizontal

ce qui suit nous allons énoncer un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans l'Algérie, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens.

Les Principaux composants des éoliennes à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontale (Figure III.3), étant le sujet de notre étude, En générale, est constitué de trois éléments principaux : La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu.

- **La tour:**

C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.

- **La nacelle:**

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :

- **Arbre.**
- **Multiplicateur.**
- **Roulements.**
- **Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.**
- **Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une GADA.**
- **Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle.**

- **Les pales:** Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- **Le moyeu:** C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent

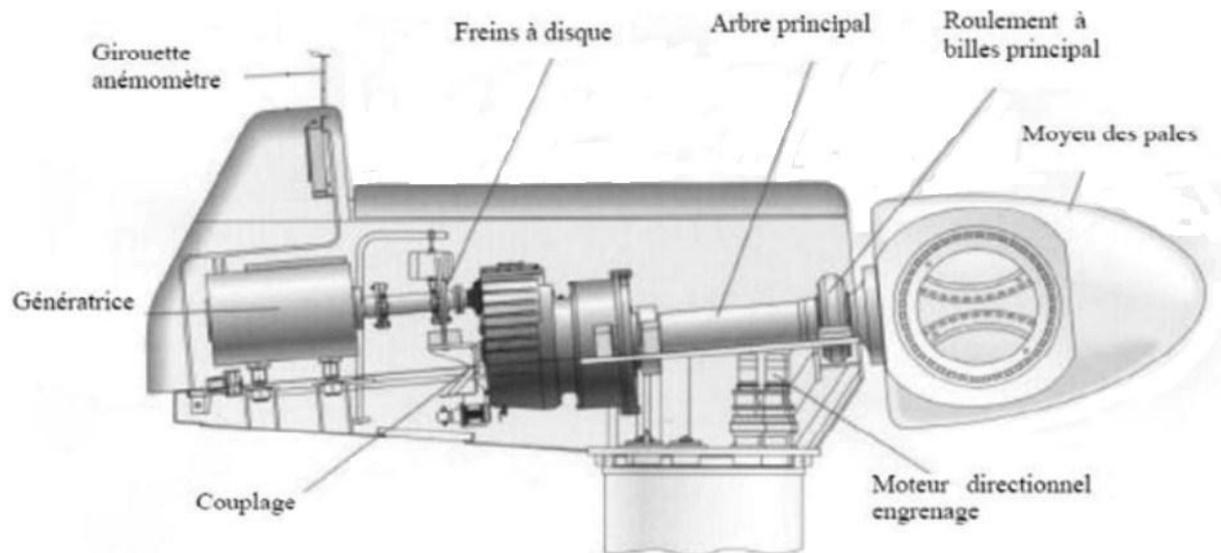


Figure4. Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.

On se propose dans notre mémoire de faire une étude avec simulation d'un aérogénérateur. Le chapitre un traitera exclusivement de la modélisation et simulation de la turbine. Le second chapitre sera consacré à l'étude et simulation de la MADA adossé à la turbine traité au chapitre précédent. Pour ce qui est du chapitre trois, il sera consacré à l'exploitation de deux autres procédé pour pouvoir faire une étude comparative sur la pertinence d'exploité des régulateurs intelligents.

Chapitre I

Etude et simulation

d'une Turbine

I.1 -Introduction :

L'éolienne assure la conversion partielle de l'énergie cinétique capté par le vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus avec la possibilité de maximiser cette conversion énergétique tout en tenant compte de la nature de la génératrice, avec la nécessité d'avoir une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et la génératrice électrique couplé.

Nous nous proposons dans ce premier chapitre de valider notre modèle de turbine avec l'objectif de l'utiliser dans le modèle global de notre aérogénérateur.

Pour cela nous allons dans un premier temps définir un profil de vent, ensuite nous nous intéresserons à présenter les différents modèles de turbines, tout en mettant l'accent sur ses paramètres les plus importants. La commande MPPT avec asservissement de vitesse sera traitée ainsi que les performances du régulateur PI. Cette étude proposée se fera en simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink SimPower System.

I.2 - Modélisation du vent :

Le vent est considéré comme une énergie primaire pour les aérogénérateurs tout en étant une source d'énergie renouvelable et inépuisable. Cette variation intermittente de la vitesse du vent est obtenue suite à des phénomènes atmosphériques de sorte que lors d'une différence de température entre deux points va induire des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par-dessus l'air le plus froid (le plus lourd). [07].

La modélisation des aérogénérateurs nécessite une connaissance de la variation de la vitesse du vent au cours du temps. Lors de notre recherche bibliographique nous avons identifié deux modélisations de profil de vent, la première établie par C. Nichita. Cette approche est basée sur la génération de l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique

une fonction de transfert à déterminer. les paramètres dépendent des caractéristiques du site et de la nature du vent [08].

Cette fonction de transfert est donnée par :

$$HH_{FF} = KK_{FF} \frac{(m_1 T_F S + 1)}{(T_F S + 1)(m_2 T_F S + 1)} \quad (II. 1)$$

Avec:

m_1 Et m_2 étant les paramètres de Nichita:
 $m_1 = 0.4$ et $m_2 = 0.25$

KK_{FF} et TT_{FF} sont des paramètres mathématiques et sont calculés selon les expressions suivantes:

$$TT_{FF} = \frac{LL_{FF}}{VV} \quad (II. 2)$$

Avec :

LL_{FF} : Longueur d'échelle de la turbulence du vent VV_{tt} . (Cette valeur dépend des caractéristiques du site, et varie de 100 en mer à 500 dans les zones turbulences.

VV : La valeur moyenne de la vitesse du vent qui dépend de la nature du vent (faible, moyen ou fort).

$$KK_{FF} = \frac{\pi}{TT_{SS} \Delta\omega \omega SS_{FF}} \quad (II. 3)$$

Avec :

TT_{SS} : La période d'échantillonnage.

$\Delta\omega$: 0.002rad/s.

$$SS_{FF} = \frac{\pi}{KK=0} \frac{(m_1 T_F k \Delta\omega)^2 + 1}{[(T_F k \Delta\omega)^2 + 1][(m_2 T_F k \Delta\omega)^2 + 1]} \quad (II. 4)$$

L'expression de la vitesse du vent en un point fixe peut être représentée par :

$$VV_0(tt) = VV + VV_{tt}(tt) \quad (II. 5)$$

Avec :

$VV_{tt}(tt)$: Cette composante représentant la turbulence. $VV_{tt}(tt)$ est caractérisée par la longueur d'échelle LL_{FF} et par l'écart type σ_{vv} de cette turbulence qui dépend de la valeur moyenne de la vitesse du vent V par la relation :

$$\sigma_{vv} = KK_{\sigma\sigma} VV \quad (II. 6)$$

Où :

$KK_{\sigma\sigma}$: représente l'intensité de la turbulence. La valeur de ce coefficient varie de 0,1 en mer à 0,25 dans une zone turbulente.

La figure ci-dessous représente l'allure de la courbe de vent par la méthode de Nichita avec une valeur moyenne de 6m/s :

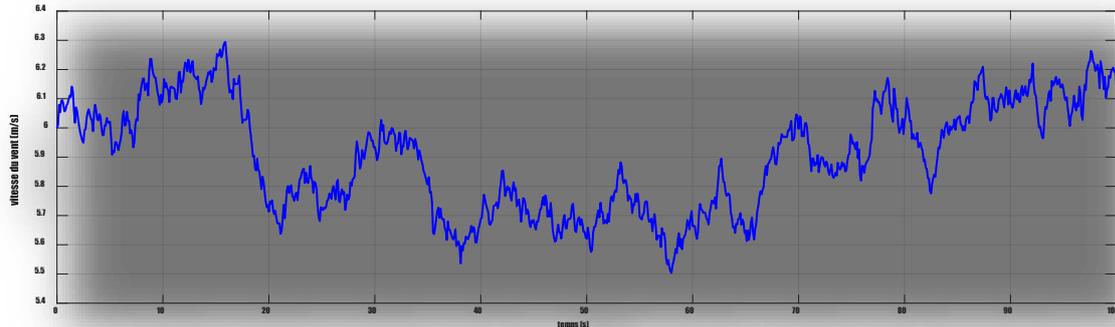


Figure I.1 : Vitesse de vent en fonction de temps [Nichita].

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps $VV_{VV} = ff(tt)$, cette fonction peut être décomposée en une composante moyenne, variant lentement avec des fluctuations [09].

$$VV_{vvvvvvt} = VV_0 + \sum_{ii=1} AA_{ii} ssssss(ww_{ii} + \varphi\varphi_{ii}) \quad (II.7)$$

Avec :

VV_0 : C'est la composante moyenne.

AA_{ii} : C'est l'amplitude.

$ww_{ii} \varphi\varphi_{ii}$: La pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuante.

Pour ce qui est du second modèle énoncé par Van Der Hoven, il est exprimé par l'équation suivante:

$$VV_{vvvvvvt} = VV_0 + 0.2 ssssss(0.1047tt)$$

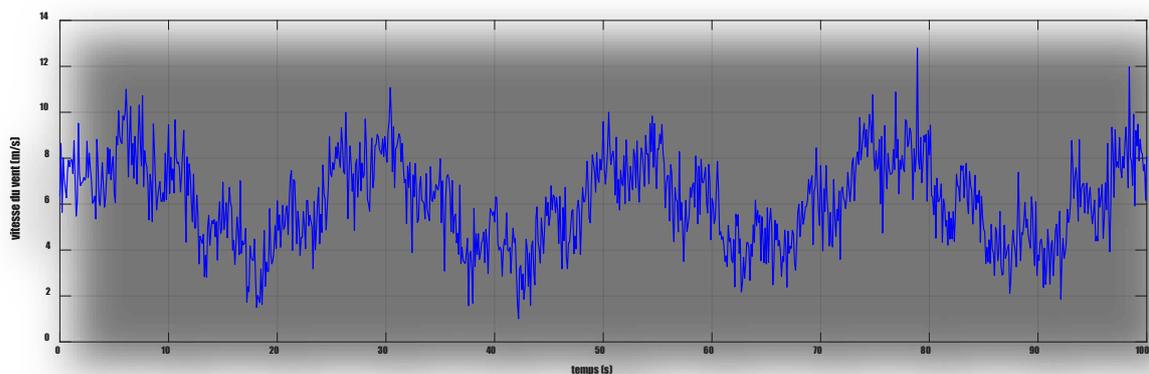


Figure I.2: Vitesse de vent en fonction de temps [Van Der Hoven].

(II. 8)

$$+ 2 \text{ ssssss}(0.2665tt) + \text{ ssssss}(1.2930tt) + \text{ ssssss}(3.6645tt)$$

Après la simulation, l'allure du profile de vent pour une vitesse de moyenne de 6m/s est comme suite:

I.3- Loi Betz :

Il est possible d'évaluer la puissance extraite du vent en utilisant le calcul basé sur l'énergie cinétique de la masse d'air déplacée. Si l'on considère une éolienne à axe horizontal, la masse d'air qui arrive devant l'hélice avec la vitesse V_1 repart, après avoir entraîné l'hélice, avec la vitesse V_2 . En considérons que la vitesse de la masse d'air au niveau de l'hélice corresponde à la moyenne entre la vitesse amont et la vitesse aval. On peut alors déterminer la masse d'air m qui traverse l'hélice à chaque seconde [10].

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit :

$$\frac{VV_1 + VV_2}{2} \quad (II. 9)$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde s 'exprime par :

$$mm = \rho \frac{S (VV_1 + VV_2)}{2} \quad (II. 10)$$

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

$$PP_{mm} = \frac{mm(V_1 - VV_2)}{2} \quad (II. 11) \quad \begin{matrix} 2 \\ 2 \end{matrix}$$

Soit en remplaçant mm par son expression dans (I.II):

$$PP_{mm} = \frac{\rho \rho SS (VV_1 + VV_2)(VV_1^2 - VV_2^2)}{4} \quad (II. 12)$$

avec :

VV_0 : La vitesse initiale du vent.

SS_0 : La surface à l'entrée du tube de courant.

V_1 : La vitesse du vent dans le plan du rotor.
 V_2 : La vitesse du vent à l'aval du rotor.

S_1 : Surface du rotor.
 S_2 : Surface à l'aval du rotor.

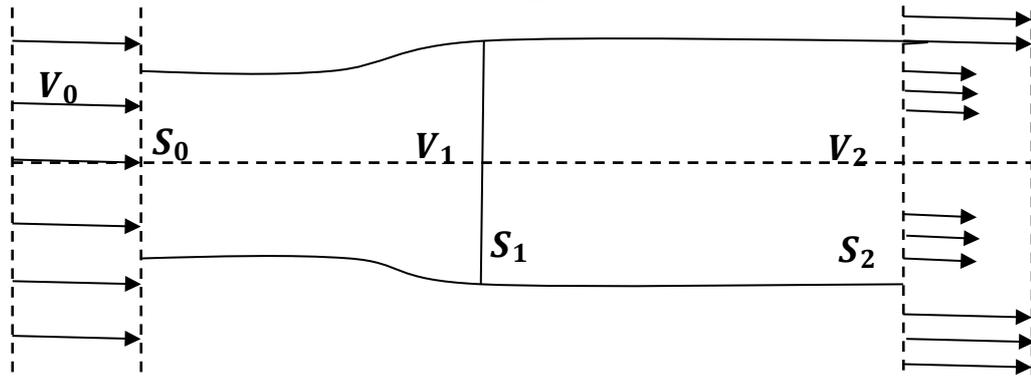


Figure I.3: tube de courant d'air autour d'une turbine éolienne.

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

$$PP_{mm_tttttttiivvvv} = \rho \frac{S V_1^3}{2} \quad (II. 13)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{PP_{mm_tttttttiivvvv}}{PP_{mm_tttttttiivvvv}} = \frac{1 + \frac{V_2}{V_1}}{2} \quad (II. 14)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (voir Figure I.4), on s'aperçoit que le terme ($\frac{PP_{mm_tttttttiivvvv}}{PP_{mm_tttttttiivvvv}}$) appelé aussi coefficient de puissance C_{p} présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est possède son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

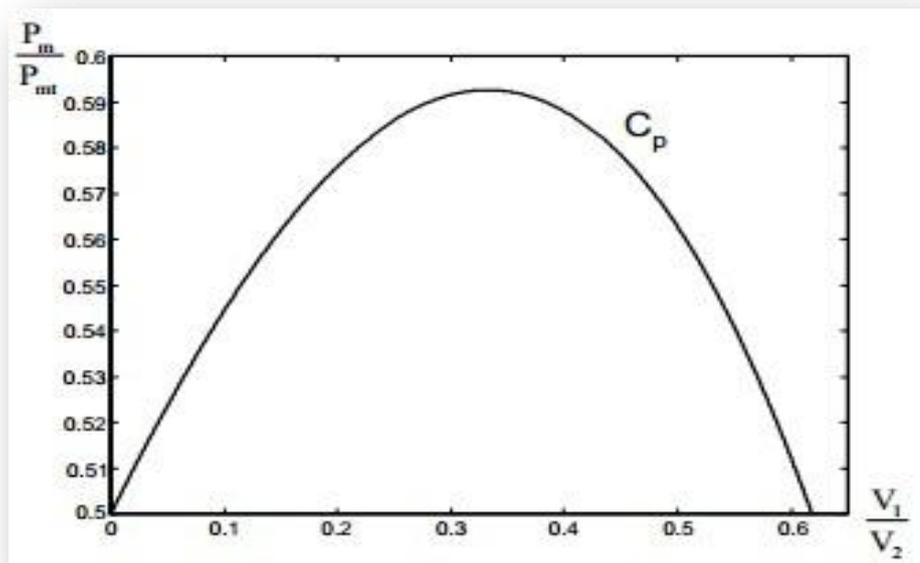


Figure I.4: Coefficient de puissance

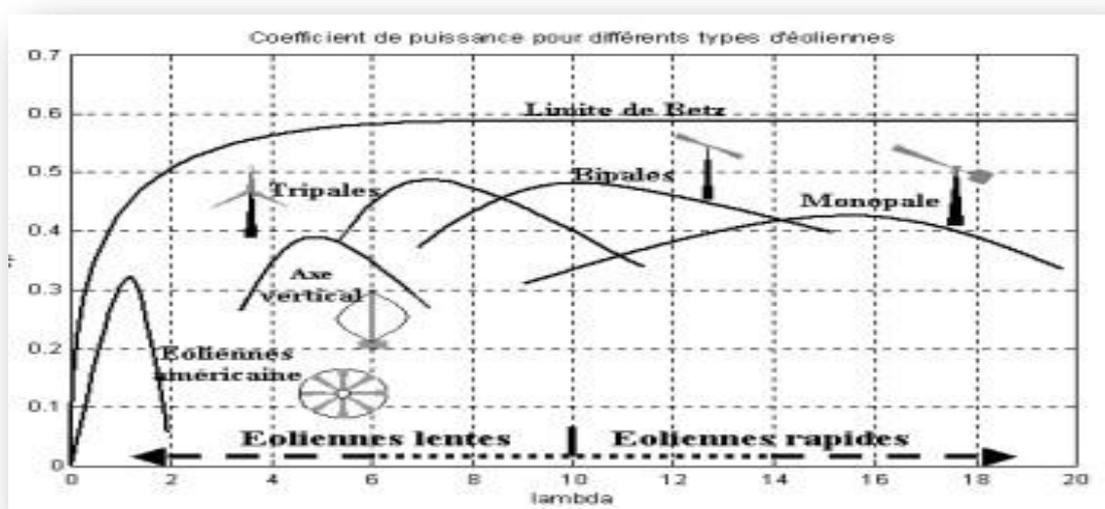


Figure I.5: coefficient de puissance pour différent type d'éolienne

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (voir Figure I.5) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts. Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [11].

I.4 -Modèle de la turbine :

Le dispositif traité dans notre étude est composé d'une turbine éolienne d'une puissance nominale de 2MW, comprenant des pales de rayon de 40 m qui entraîne une génératrice à travers un multiplicateur de gain $G = 90$.

I.4.1- Coefficient de puissance :

Le coefficient de puissance C_{PP} indique le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il est en fonction de la vitesse spécifique λ et de l'angle de calage des pales β . Il est différent d'une turbine à une autre.

Pour notre étude, ce coefficient est calculé sur la base de l'expression analytique suivante [12] :

$$C_{PP} = 0.18 \frac{90 - 6.8 - 0.115\beta}{0.4 + 0.5\lambda} \overline{e^{0.4 - 80.5\lambda + 0.16}} \quad (II. 16)$$

I.4.2 la Puissance et le couple aérodynamique :

La puissance aérodynamique extraite à partir du vent peut être exprimé comme suit [13] [14] :

$$PP_{aa} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) * \rho * \pi * R^2 * V^3 \quad (II. 16)$$

Le couple aérodynamique extrait par la turbine est défini par l'équation suivante :

$$TT_{aa} = \frac{PP_{aa}}{\Omega} \quad (II. 17)$$

PP_{aa} : Puissance aérodynamique (W).

TT_{aa} : Couple aérodynamique (Nm).

C_{pp} : Coefficient de puissance.

R: Le rayon de la turbine (m).

β : Angle d'orientation des pales en degré (°).

Ω_{tt} : Vitesse de la turbine (rad/s).

VV : La vitesse du vent (m/s).

ρ : La masse volumique de l'air (approximativement 1.225 kg/m^3 à la pression atmosphérique et à 15°C).

PP

I.4.3- Vitesse relative :

La vitesse relative est définie par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_{tt} R}{VV} \quad (II. 18)$$

Avec :

$C_{pp}(\lambda, \beta)$: Coefficient de puissance.

Ω_{tt} : Vitesse de la turbine (rad/s).

La figure I.6 représente le coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative et angle de calage beta :

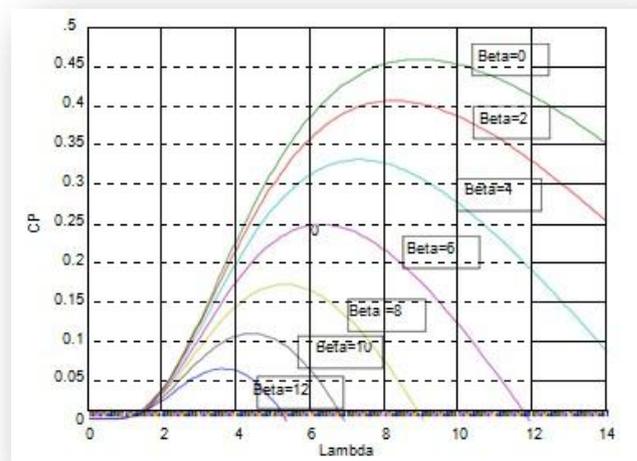


Figure I.6 Courbes de C_p en fonction de (λ, β)

I.5- Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple d'entraînement de la génératrice selon les formules mathématiques suivantes :

$$T_{mmécc} = \frac{CC_{tt}}{G} \quad (II. 18)$$

$$\Omega_{tt} = \frac{\Omega}{G} \quad (II. 19)$$

G : Rapport de multiplicateur.

$T_{mmécc}$: Couple mécanique(Nm).

Ω : vitesse de la génératrice (rad/s).

CC_{tt} : Couple turbin (Nm).

Ω_{tt} : vitesse du turbin (rad/s).

I.6- Modélisation de l'éolienne à deux masses :

Le modèle de l'éolienne considéré est le modèle à deux masses, Son schéma est illustré sur la Figure I.7 [15].

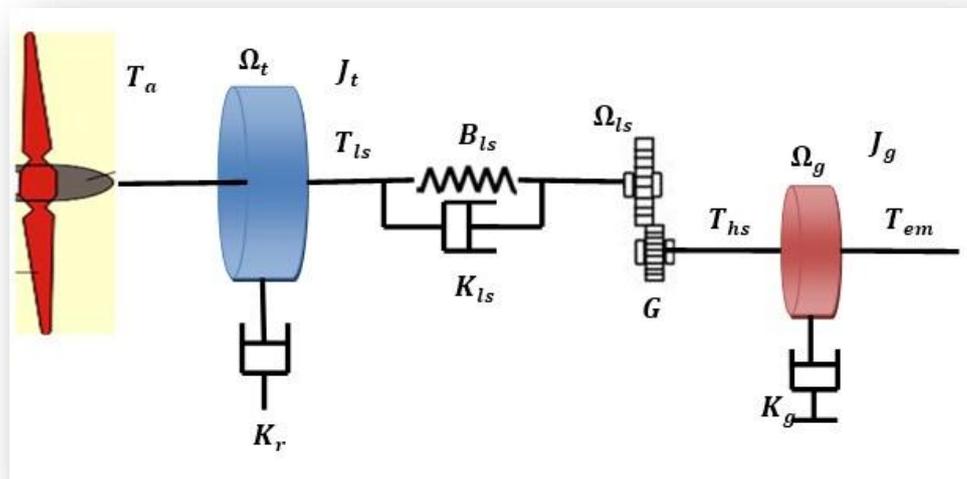


Figure I.7: Schéma du dispositif d'entraînement à deux masses.

Les hypothèses relatives à ce modèle sont [16] [17]:

- Les modes flexibles sont localisés dans l'élément flexible de l'arbre lent par contre, l'arbre rapide est considéré comme infiniment rigide quant aux autres flexibles des pales sont supposés suffisamment élevés pour être négligés ;
- Les inerties du multiplicateur et de l'arbre lent sont intégrées à celle du rotor, l'ensemble est représenté par J_t ;
- L'inertie du moyeu peut être négligée car elle représente 1% de l'inertie totale de la turbine et l'inertie de l'arbre rapide associé à la génératrice est représentée par J_g ;
- La torsion de l'axe de la turbine, en termes de constance de raideur, est calculable analytiquement, sous réserve de connaître sa forme géométrique ;
- Un coefficient d'élasticité global représenté sur l'arbre lent B_{ls} regroupe les torsions des pales, moyeu, multiplicateur et de l'arbre lent ;
- Les frottements visqueux sur les roulements du dispositif d'entraînement sont pris en compte par les coefficients K_r et K_g .

Avec :

JJ_{tt} : Inertie des masses du côté de la turbine (kg.m ²)	BB_{lll} : Coefficient de torsion sur l'arbre lent (Nm/rad)
JJ_{gg} : Inertie des masses du côté de la génératrice (kg.m ²)	KK_{tt} : Coefficient de frottements externes du rotor (Nm/rad)
T_{ls} : Coefficient de frottements sur l'arbre de la génératrice (Nm/rad)	KK_{gg} : Coefficient de frottements externes lent de la génératrice (Nm/rad)
Ω_{tt} : Vitesse du rotor (rad/s)	T_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice (Nm)

I.6.1- Modèle dynamique :

La dynamique du rotor est définie par l'équation différentielle suivante :

$$JJ_{tt} \frac{d\Omega_{tt}}{dt} = (TT_{aa} - TT_{lll} - BB_{tt}\Omega_{tt}) \quad (II. 20)$$

Le générateur est entraîné par le couple de l'arbre rapide TT_{hl} , est exprimée par l'équation suivante :

$$JJ_{gg} \frac{d\Omega_{gg}}{dt} = (TT_{hl} - TT_{vmm} - BB_{gg}\Omega_{gg}) \quad (II. 21)$$

Le couple de l'arbre lent TT_{lll} résulte des effets de frottements et de torsion générés par les écarts entre la vitesse angulaire du rotor Ω_{tt} et celle de l'arbre lent Ω_{lll} , et par l'écart entre la position angulaire du rotor θ_{tt} et celle de l'arbre lent θ_{lll} d'autre part :

$$TT_{lll} = BB_{lll}(\theta_{tt} - \theta_{lll}) + BB_{lll}(\Omega_{tt} - \Omega_{lll}) \quad (II. 22)$$

I.6.2- Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur est un dispositif de liaison entre la turbine et le générateur, il est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$GG = \frac{TT_{lll}}{TT_{lll}} = \frac{\Omega_{gg}}{\Omega_{lll}} = \frac{\theta_{gg}}{\theta_{lll}} \quad (II. 23)$$

Avec : G : Rapport de transmission du multiplicateur. TT_{lll} : Couple de l'arbre lent (Nm).

TT_{lll} : Couple de l'arbre rapide (Nm).

Ω_{gg} : Vitesse de la génératrice (rad/s).

Ω_{lll} : Vitesse de l'arbre lent (rad/s).

I.7- Modélisation de l'éolienne à une masse :

Dans le cas des grandes éoliennes, l'arbre lent du dispositif d'entraînement peut être considéré comme parfaitement rigide. Le modèle à deux masses décrit au paragraphe précédent peut alors se ramener à un modèle à une masse; constitué d'une seule inertie et d'un seul coefficient de frottement regroupant tous les coefficients de frottements externes, en considérant quelques hypothèses [15]:

- Les arbres de transmission sont parfaitement rigides .
- Le multiplicateur de vitesse est idéal .
- L'inertie de la génératrice J_g peut être négligée devant celle de la turbine J_r ou ramenée du côté de l'arbre lent.

L'inertie du multiplicateur et celle de la génératrice peuvent être, en première approximation, négligées devant celle du rotor. Elles représentent en moyenne entre 5 % et 10 % de l'inertie de la turbine, cette conception peut omettre certaines propriétés du couplage mécanique, car elle ne prend pas en compte la flexibilité du dispositif d'entraînement. [15]

**I.7.1-
masse
l'arbre lent :**

**Modèle à une
ramenée sur**

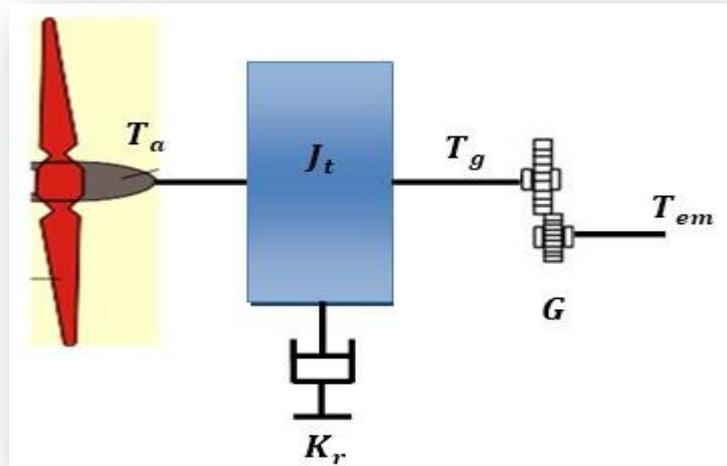


Figure I.8: Modèle à une masse du dispositif d'entraînement ramené sur l'arbre lent.

Dans la plupart des modèles à une masse rencontrée lors de notre recherche bibliographique, l'inertie de la turbine est ramenée sur l'arbre lent.

En considérant que l'arbre lent est infiniment rigide, alors

$$\theta_{tt} = \theta_{lll} \quad e_{tt} \quad \Omega_{tt} = \Omega_{lll}$$

La relation du multiplicateur devient :

$$GG = \frac{TT_{lll} \Omega_{gg} \theta_{gg}}{TT_{lll} \Omega_{lll} \theta_{lll}} = \frac{\theta_{gg}}{\theta_{lll}} \quad (II. 24)$$

La dynamique du rotor est caractérisée par une équation différentielle du premier ordre :

$$\left\{ \begin{array}{l} J_t \frac{d\Omega_t}{dd} = (TT_{aa} - GG \cdot TT_{lll} - BB_{tt} \cdot \Omega_{tt}) \\ G \cdot J_g \frac{d\Omega_g}{dd} = (TT_{hll} - TT_{vmm} - GG \cdot BB_{gg} \cdot \Omega_{gg}) \end{array} \right. \quad (II. 25)$$

En multipliant la deuxième équation du système d'équation (II. 25) par G et en sommant membre à membre les deux équations, on aboutit à :

$$JJ_{tt} \frac{d\Omega_{tt}}{dtt} = TT_{aa} - BB_{tt} \Omega_{tt} - CC_{gg} \quad (II. 26)$$

Avec :

$$JJ_{tt} = JJ_{tt} + GG^2 JJ_{gg}$$

$$FF_{tt} = FF_{tt} + GG^2 KK_{gg} \quad (II. 27)$$

$$CC_{gg} = GG CC_{vmm}$$

I.7.2- Modèle à une masse ramené sur l'arbre rapide :

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale constituée de l'inertie de la génératrice et de celle de la turbine rapportée sur l'arbre rapide (arbre de la génératrice) comme représenté sur la figure 1.9 .

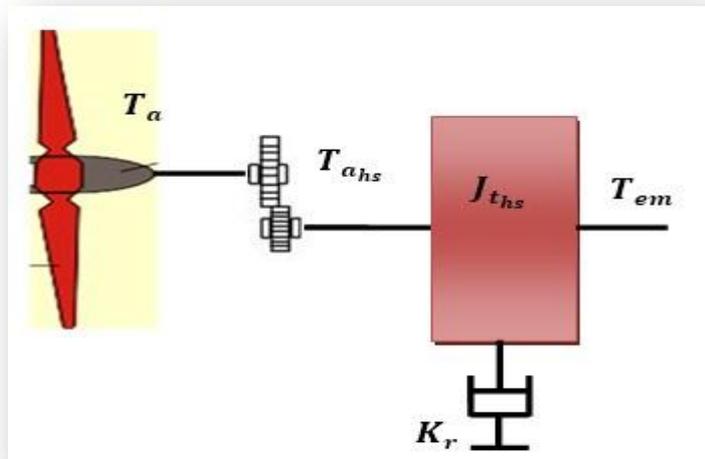


Figure I.9 : Modèle à une masse du dispositif d'entraînement ramenée sur l'arbre rapide.

Lorsque le modèle à une masse est ramené sur l'arbre rapide avec les mêmes hypothèses que précédemment, les équations deviennent :

$$\frac{J_r}{G} \frac{dd\Omega_{gg}}{dtt} = T_a - TT_{hl} - \frac{K_r}{G} \Omega_{gg} \quad (II. 28)$$

$$J_g \frac{dd\Omega_{gg}}{dtt} = TT_{hl} - K_g \cdot \Omega_{gg} - T_{em}$$

En divisant la première équation de (II. 28) par G et en sommant les deux on obtient :

$$J_{ths} \frac{d\Omega_{gg}}{dt} = C_{aahss} - F_g \Omega_{gg} - C_{em} \quad (II. 29)$$

Avec :

$$J_{ths} = J_g + G_2$$

$$C_{aahss} = G_1$$

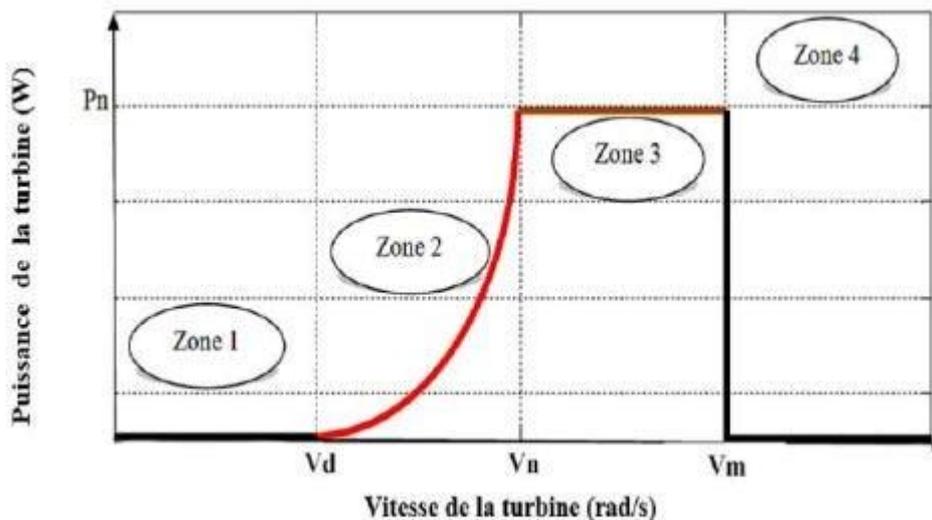
$$F_r F_{ths} = F_g + G_2 \quad (II. 30)$$

J_{ths} , F_{ths} et C_{aahss} sont l'inertie, le coefficient de frottements externes de la turbine et le couple aérodynamique ramenés du côté de l'arbre rapide. L'inertie de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine. Il est à noter que le modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide est généralement utilisé dans la commande de la génératrice.

I.8- Zones de fonctionnement d'une éolienne :

La vitesse du vent pour laquelle la puissance nominale de l'éolienne est atteinte, appelée vitesse nominale du vent V_{vv} , la production de la puissance reste constante quel que soit la vitesse du vent jusqu'à atteindre une vitesse maximale V_{mmaamm} , appelée vitesse maximale de fonctionnement pour laquelle l'éolienne est conçue et au-delà, la turbine est bloquée afin de protéger ses parties mécanique des effets néfastes des grandes vitesses du vent. La vitesse du vent la plus basse à laquelle une éolienne fonctionnera est connue comme étant la vitesse de seuil V_u . Entre V_u et V_{vv} , la production de la puissance varie avec la vitesse du vent [18].

Ainsi la



caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones:

Figure I.10 : diagramme des zones de fonctionnement d'une éolienne.

- ✓ **Zone 1**, où $P_{\text{turbine}} = 0$, la turbine ne fournit pas de puissance (inférieure à la vitesse de seille V_s insuffisantes pour entrainer l'éolienne);
- ✓ **Zone 2**, Dans cette zone la vitesse de vent est supérieure à la vitesse de seille et inférieure à la vitesse nominale de l'éolienne. Dans cette partie qui est caractérisée par une puissance proportionnelle au cube de la vitesse du vent, l'angle de calage est maintenu constant, et c'est le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice qui va être mis en œuvre. Ceci se fait en gardant le coefficient de puissance $C_p = C_{p_{\text{max}}}$ de manière à tirer le maximum de profit de la vitesse du vent et généré le maximum d'énergie électrique possible. Dans cette zone, la courbe de puissance de la génératrice suit une progression rapide.
- ✓ **Zone 3**, dans cette zone la vitesse de vent est supérieure à la vitesse nominale et inférieure à la vitesse maximale V_{max} de déclenchement, le coefficient de puissance C_p doit être contrôlé. L'augmentation de la vitesse de vent va s'accompagner d'une décroissance du coefficient C_p et d'une augmentation moins rapide de la puissance récupérée où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n ;
- ✓ **Zone 4**, la vitesse de vent devient trop forte et dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice [19] :

- ✓ Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » permet d'ajuster l'angle de calage des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone 3 de vitesses ;
- ✓ Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales).

I.9- Technique d'extraction de maximum de puissance :

Le but principal de cette commande est le réglage de la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite par l'éolienne, et cela, par le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice. Cette stratégie de commande est connue par la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de commandes [20]. ✓ Commande avec asservissement de la vitesse de rotation ; ✓ Commande sans asservissement de la vitesse de rotation.

Le principe de la stratégie MPPT consiste, pour un angle de pale donné à ajuster en fonction de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine éolienne à une valeur de référence pour maintenir une vitesse relative optimale et donc un coefficient de puissance maximal. Nous pouvons donc réécrire l'équation de la façon suivante :

$$\Omega_{opt} = V \frac{\lambda_{opt}}{R} \quad (II. 31)$$

I.9.1- Commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation :

Les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance. On suppose que la génératrice et son variateur sont idéaux [21] :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_m - C_{mv} - C_{villv}) \quad (II. 32)$$

Pour réaliser ceci, on utilise un asservissement de vitesse. Cet asservissement consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. La formule du couple est donnée par l'équation suivante :

Les paramètres du régulateur KK_{pp} et KK_{ii} seront en fonction de deux grandeurs : $\xi\xi$: Coefficient d'amortissement. $\omega\omega_{NN}$: Pulsation propre non amortie

La fonction de transfert obtenue en boucle ouvert est définie par :

$$FTTBBFF(s) = \frac{KK_{ii}}{JJ} \frac{1}{ss} + \frac{KK_{pp} + KK_{ii}}{JJ} = \frac{KK_{ii}}{JJ} \frac{1}{ss} + \frac{KK_{pp} + KK_{ii}}{JJ} \quad (II. 35)$$

La fonction de transfert obtenue en boucle fermée est définie par :

$$FTBF(s) = 1 + \frac{KK_{pp} + KK_{ii}}{ff \cdot ss + JJ \cdot ss^2} = \frac{KK_{ii} + KK_{pp} \cdot ss}{JJ \cdot ss^2 + ff \cdot ss + JJ} \quad (II. 36)$$

La fonction de transfert est alors identifiée à une fonction du second ordre sans zéro :

$$FTBF(s) = \frac{KK_{ii} + KK_{pp} \cdot ss}{JJ \cdot ss^2 + ff \cdot ss + JJ} = \frac{\xi\xi \cdot \omega\omega_{vv} \cdot JJ - ff}{JJ} \frac{1}{ss^2 + 2 \cdot \xi\xi \cdot \omega\omega_{vv} \cdot ss + \omega\omega_{vv}^2} \quad (II. 37)$$

En Utilisant la méthode par identification on obtient les paramètres de régulateur :

$$(II. 38) \quad \frac{KK_{ii} + KK_{pp} \cdot ss}{JJ} = \frac{\xi\xi \cdot \omega\omega_{vv} \cdot JJ - ff}{JJ} \frac{1}{ss^2 + 2 \cdot \xi\xi \cdot \omega\omega_{vv} \cdot ss + \omega\omega_{vv}^2} \implies \begin{cases} KK_{pp} = \xi\xi \cdot \omega\omega_{vv} \cdot JJ - ff \\ KK_{ii} = \xi\xi \cdot \omega\omega_{vv} \cdot JJ \end{cases}$$

Le temps de réponse réduit est minimal pour un coefficient d'amortissement égale à soit

$$\xi\xi = 0.7$$

I.11-Résultats de simulation :

I.11.1 Model du simulation:

Sous l'environnement Matlab/Simulink, nous avons reproduit le modèle (Annexe 01) de notre turbine en intégrant les deux modèles de Nichita et Van Der-Haven.

Ce modèle à simuler va nous permettre de suivre l'évolution de nos paramètres tout en évaluant les performances de notre régulateur PI. Les figures ci-dessous représentent l'allure de différents paramètres du système en fonction du temps (60s) pour une vitesse de vent moyenne égale à 10m/s avec la stratégie de Commande MPPT avec asservissement pour rester toujours dans la zone 2 avec un angle de calage fixe ($\beta = 2$).

I.11.2 Interprétations des résultats :

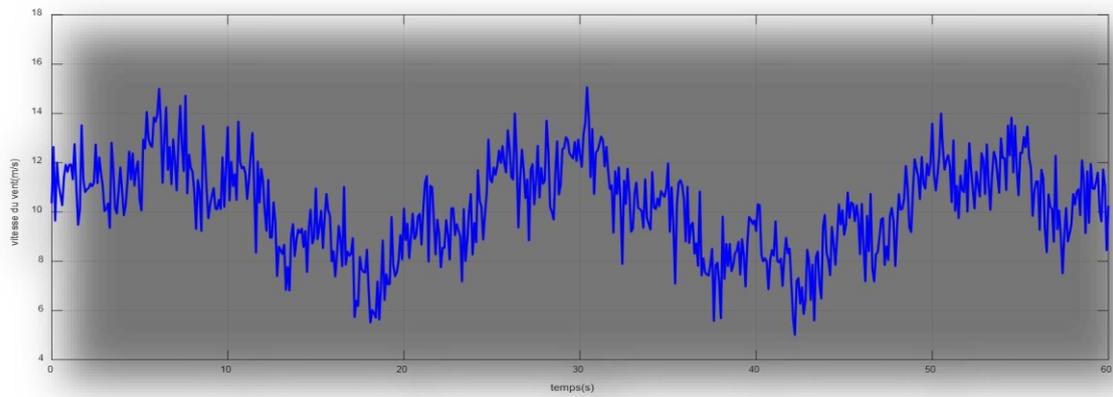


Figure I.13 : Vitesse de vent (m/s)

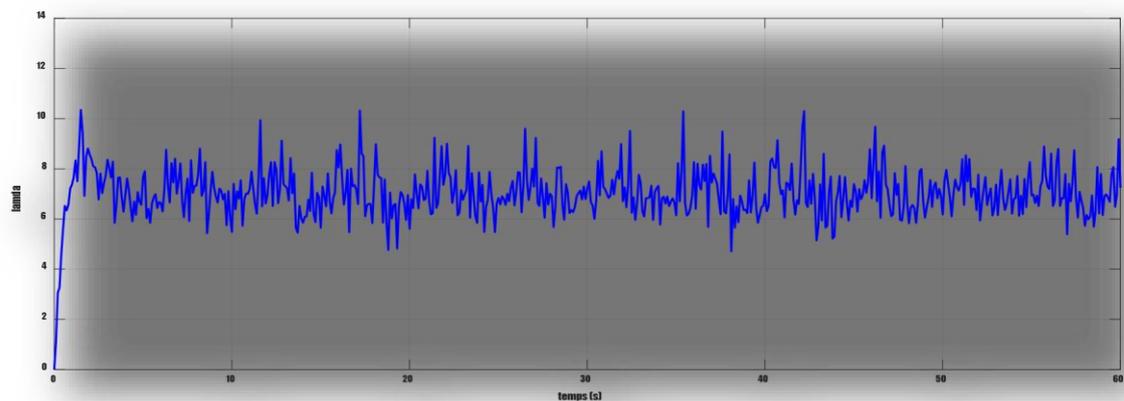


Figure I.14 : Vitesse relative (m/s)

La Figure I.14: La figure représente l'évolution de la vitesse relative de vent $\lambda\lambda$ en fonction du temps pour un profile de vent obtenue à partir du modèle de Ven Der-Hoven, l'allure

présente une faible variations dans le régime permanent avec un valeur moyenne de ($\lambda = 7$)

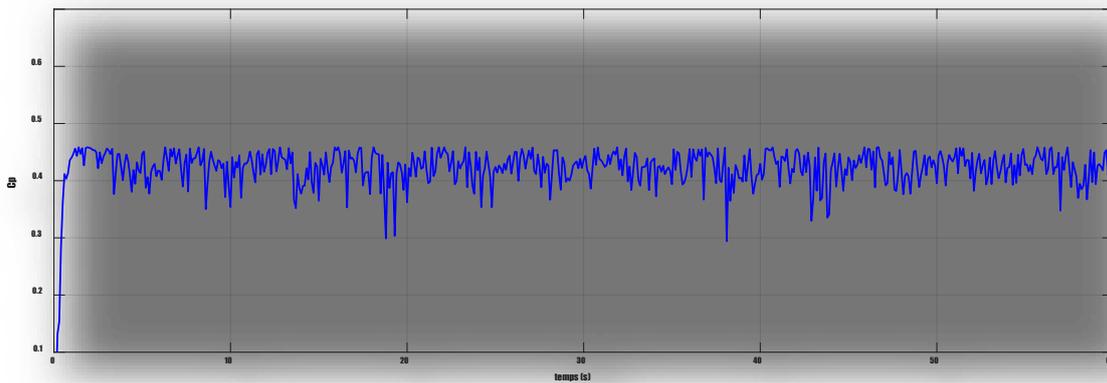


Figure I.15 : Coefficient de puissance C_p .

avec un temps de réponse relativement faible par rapport à l'inertie présenté par la turbine ($t=2s$).

La Figure I.15: La figure montre l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction du temps pour un vitesse du vent variable (Ven Der Hoven) , l'allure prend une forme relativement stable ce qui donne ($CC_{PP} = 0.43$) à ($t=2s$).

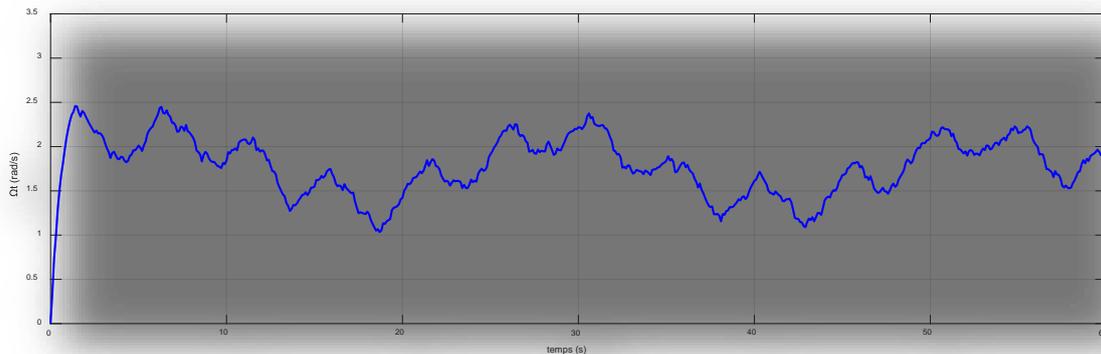
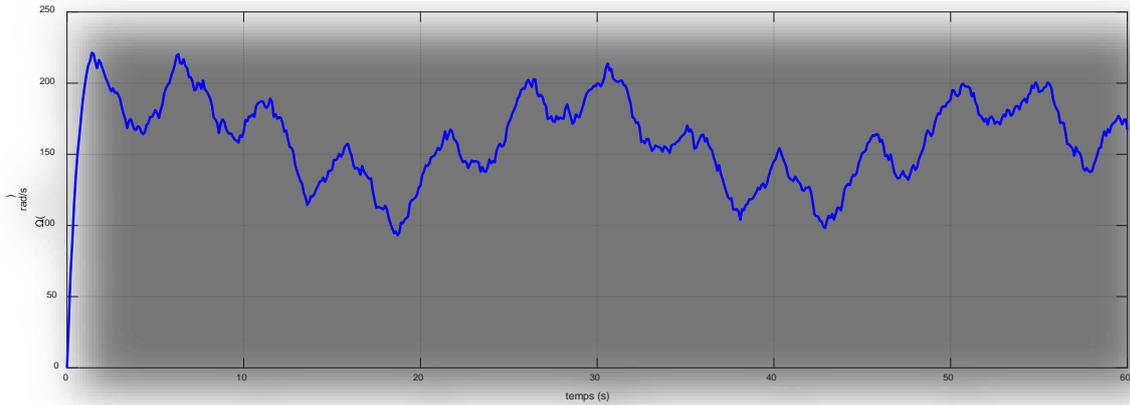


Figure I.16: Vitesse mécanique (rad/s).

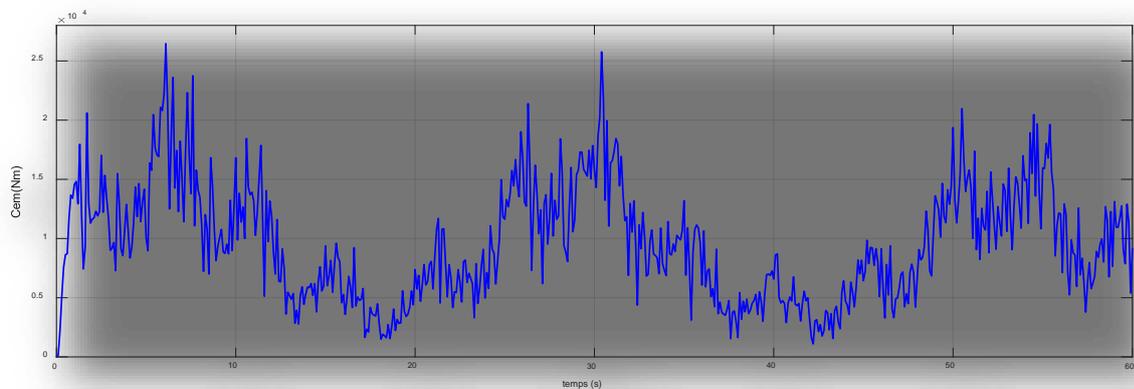
La Figure I.16 : La figure représente l'évolution Vitesse mécanique du turbin en fonction du



temps pour un vitesse de vent variable la valeur moyenne elle est autour de (1.75rad/s)

La Figure I.17 : vitesse de la génératrice (rad/s).

La Figure I.17 : L'évolution de la vitesse génératrice présente un régime transitoire et se stabilise à la valeur de (170rad/s).



La Figure I.18 : Couple mécanique (Nm).

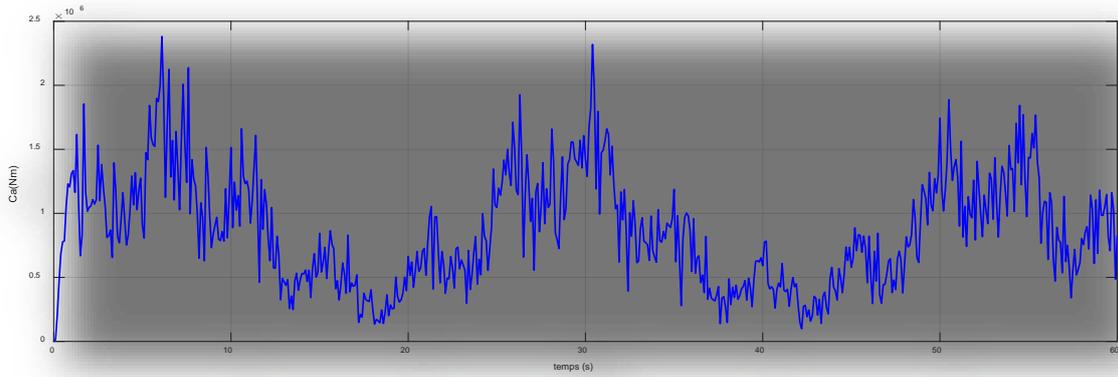
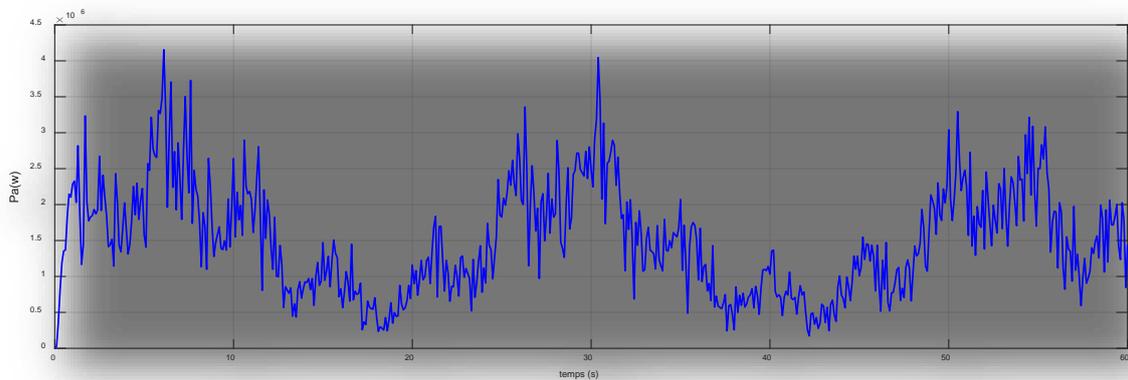


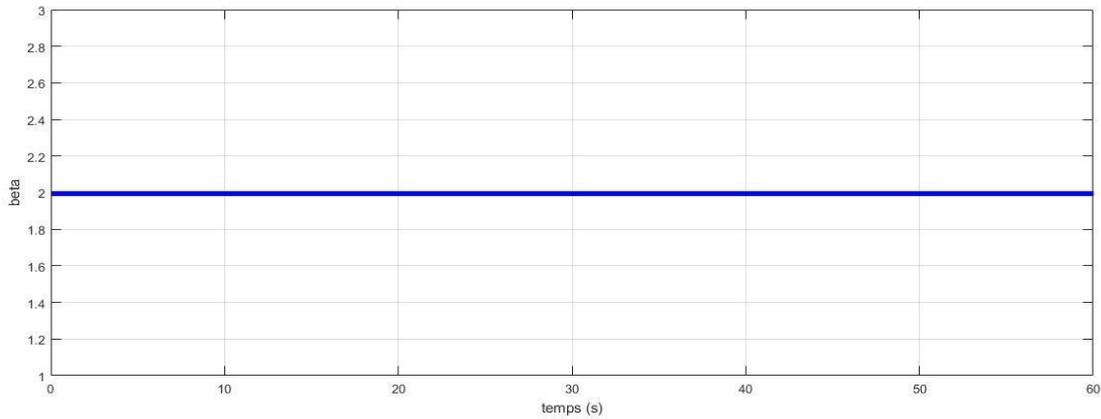
Figure I.19: Couple aérodynamique (Nm).

La Figure I.18 et I.19 : La figure de la Couple mécanique prend une image de l'évolution de la vitesse mécanique, il atteint la valeur 13000 (Nm), idem pour le couple aérodynamique.



La Figure I.20 : puissance aérodynamique (w).

La Figure I.20: l'évolution de la puissance captée par notre système de 2 MW et c'est varier en fonction de la vitesse de vent.



La Figure I.21: angle de calage β (degré).

La Figure I.21: Nous sommes à fonctionnement normale a la zone 2 ce qui confirme par le résultat de simulation que l'angle de calage β est maintenu constant à une valeur optimale de 2 degrés.

I.12-Conclusion :

L'étude établie dans ce premier chapitre nous a permis dans une première phase, de définir un profil de vent sur la base de notre recherche bibliographique avec le choix du modèle de Van Der Hoven, en seconde phase, nous avons effectué une présentation des principes de fonctionnement et modèles de certaines turbines, quel soit à une ou deux masses. En dernier lieu, nous avons effectué une série de simulation adoptant la commande MPPT avec asservissement de vitesse qui nous a permis de mettre en évidence les performances de notre régulateur PI tout en présentant l'évolution des différents paramètres C_p , λ et β .

Le premier chapitre, nous a permis de valider notre modèle de turbine qui sera intégré lors de l'étude de chapitre suivant.

Chapitre II
Etude et simulation D'une
génératrice à double
alimentation

II.1- Introduction

Afin de permettre la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique plusieurs types des machines électriques sont utilisés à savoir les machines synchrones ou asynchrones. La machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) présente un grand intérêt surtout en tant que génératrice dans le domaine des énergies renouvelables.

Après avoir validé le modèle de la turbine, nous nous proposons de valider le modèle de la génératrice à double alimentation. En premier, nous présenterons la structure de cette machine, exposer ses différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées tout en citant ses avantages et inconvénients. La seconde partie traitera de la modélisation de MADA en mode génératrice, ceci a pour objectif la connaissance du comportement de ce type de machine. La commande directe sera développée. Une série de simulation sera effectuée pour mettre en évidence les performances de ses régulateurs PI.

II.2 -Structure d'une MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné est composée d'un stator identique à celui des machines asynchrones classique et un rotor bobiné par un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants :

- ✓ Stator identique ;

- ✓ Rotor composé d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les

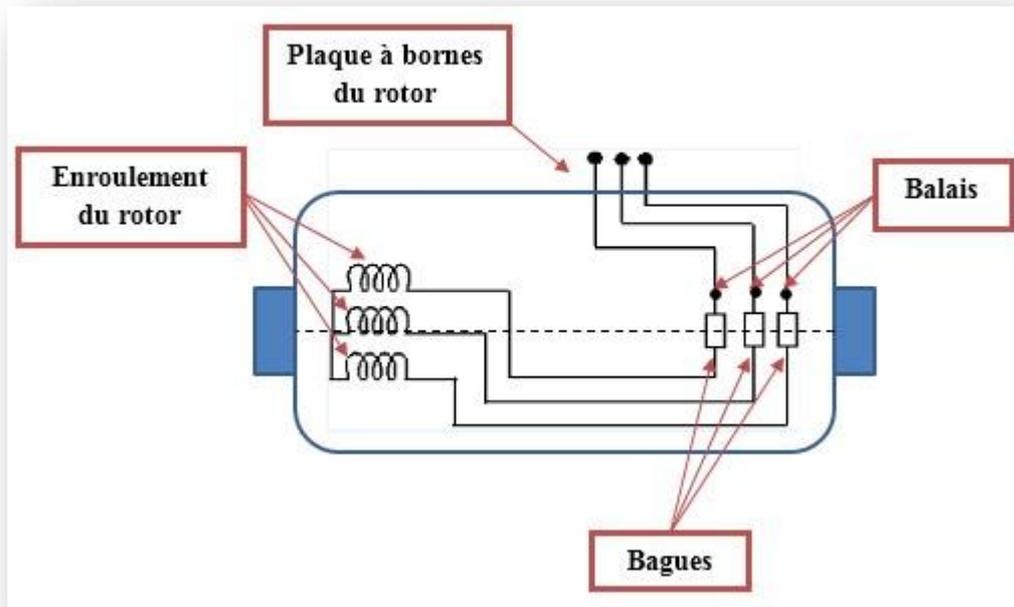


Figure II.1. Structure de rotor.

enroulements statoriques et connectés en étoile ;

II.3- Modélisation de la MADA :

II.3.1- Principe de fonctionnement de la MADA :

Le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur. La MADA permet de fonctionner en mode moteur ou génératrice mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de

fonctionner en hyper ou hypo-synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.[22] [23].

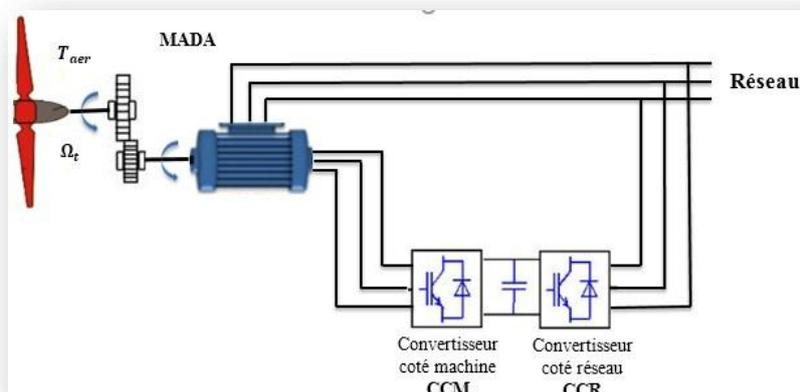


Figure II.2 : Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

II.3.2- Mode Moteur Hypo-Synchrone :

- ✓ La puissance est fournie par le réseau au stator ; ✓ La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme ;
- ✓ La puissance de glissement est renvoyée au réseau.

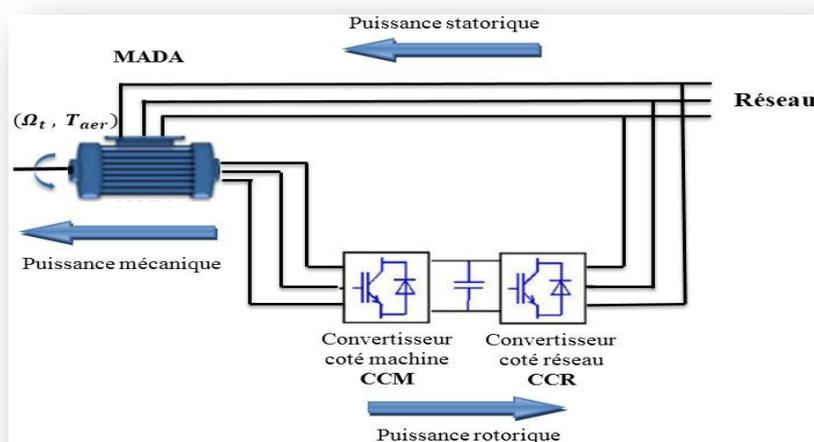


Figure II.3. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.

II.3.3- Mode Moteur Hyper-Synchrone

- ✓ La vitesse de la machine est supérieure à celle de la vitesse de synchronisme ;
- ✓ La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.

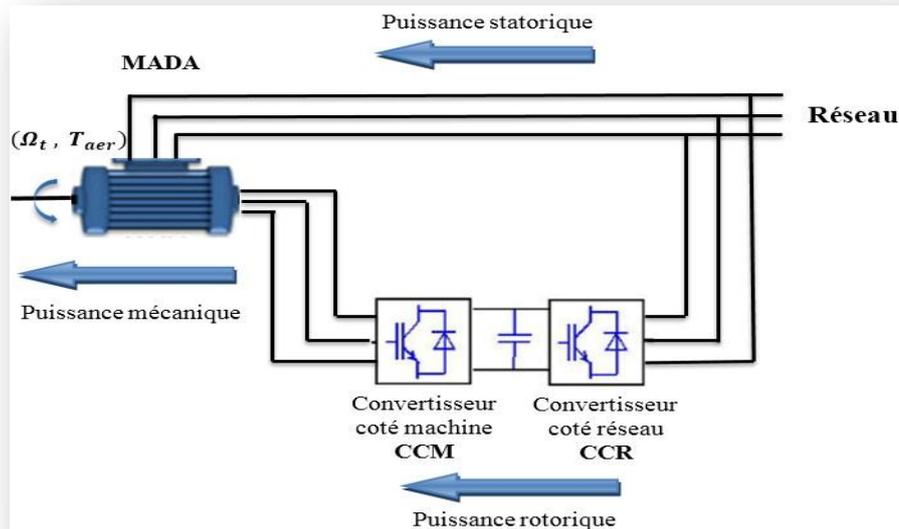


Figure II.4. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.

II.3.4- Mode Générateur Hypo-Synchrone :

- ✓ La puissance est fournie au réseau par le stator ;
- ✓ La vitesse de rotation est supérieure à la vitesse de synchronisme.

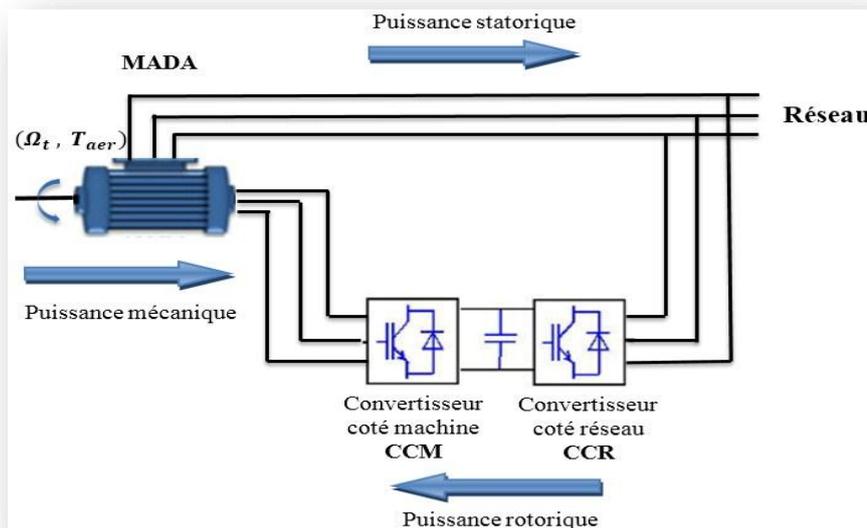


Figure II.5. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.

II.3.5- Mode Générateur Hyper-Synchrone :

- ✓ La puissance est fournie au réseau par le stator ;

- ✓ La vitesse de la machine est supérieure à la vitesse de synchronisme.

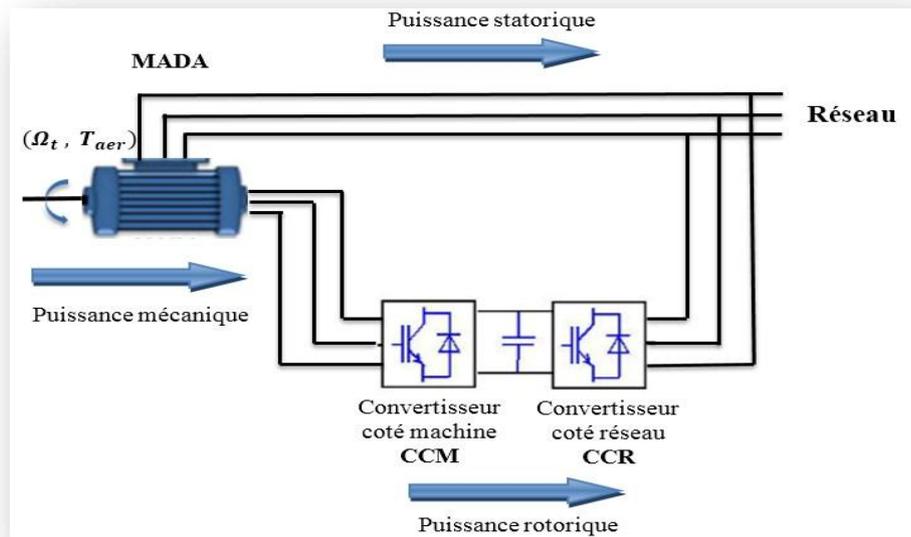


Figure II.6. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.

II. 4-Avantages et inconvénients de la MADA :

II.4.1- Avantages de la MADA :

- ✓ L'accessibilité à la mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique ;
- ✓ Elle offre plusieurs possibilités de reconfiguration grâce à sa double alimentation, ce qui permet à cette dernière de trouver un large domaine d'application ;
- ✓ Le convertisseur lié au rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la machine pour une vitesse de fonctionnement autour de celle du synchronisme. Dans ce cas, les pertes dans les interrupteurs à semi-conducteurs sont faibles, et par conséquent un rendement élevé du système de conversion ;
- ✓ La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale ;
- ✓ Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux convertisseurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation ✓ Possibilité de fonctionner à 1.33 * P_n

II.4.2-Inconvénients de la MADA :

- ✓ Machine plus volumineuse que celle à cage, elle est plus longue à causes des balais ; ✓
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage ; ✓
- Nécessite une maintenance, ce qui va augmenter le cout d'exploitation.

II.5.Modélisation de la machine à double alimentation : [25] II.5.1-

Transformation de PARK :

Le modèle classique de la machine électrique correspond au schéma monophasé équivalent, ceci n'est pas valide qu'en régime sinusoïdal à fréquence d'alimentation fixe. Pour étudier son comportement à fréquence variable et avec des signaux fournis par les convertisseurs statiques, on considère que chaque armature triphasée du stator et du rotor peut être représentée par une armature diphasée équivalente à l'aide de la méthode de Park. Donc chaque armature diphasée est représentée par deux enroulements identiques placés sur deux axes en quadrature, tout en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes, [24] [25] [26] :

- ✓ La machine est en parfaite symétrie de construction ;
 - ✓ Même nombre des phases entre le stator et rotor ;
 - ✓ Répartition sinusoïdale, l'entrefer, des champs magnétiques de chaque bobinage ; ✓
- Absence de saturation dans le circuit magnétique.

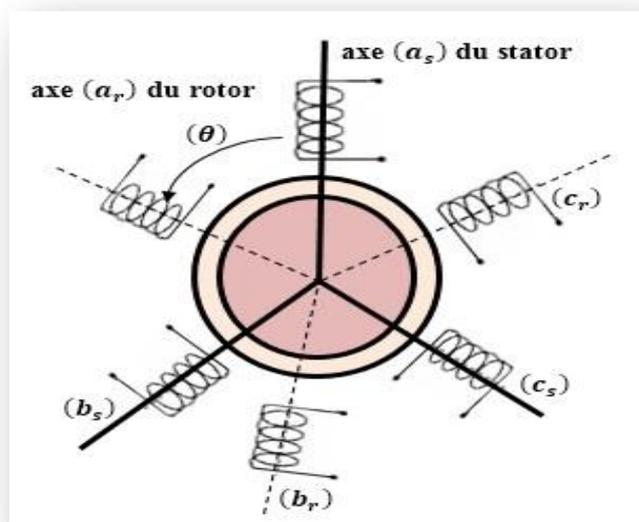


Figure II.7. Représentation de la MADA dans le système triphasé

II.5.2- Equations magnétiques : [27]

Pour le stator :

$$\begin{aligned} VV_{ssss} & RR_{SS} 0 0 ii_{ssss} dd \Psi_{ssss} \\ VV_{ssss} &= 0 RR_{SS} 0 ii_{ssss} + _ \Psi_{ssss} \\ VV_{ssss} & 0 0 RR_{SS} ii_{ssss} dddd \Psi_{ssss} \end{aligned} \quad (III. 1)$$

Pour le rotor

$$\begin{aligned} VV'_{rrss} & RR_{rr} 0 0 ii'_{rrss} dd \Psi'_{rrss} \\ VV'_{rrss} &= 0 RR_{rr} 0 ii'_{rrss} + _ \Psi'_{rrss} \\ VV'_{rrss} & 0 0 RR_{rr} ii'_{rrss} dddd \Psi'_{rrss} \end{aligned} \quad (III. 2)$$

$ii_{ssrr}(aa, bb, cc)$: Courants au stator et du rotor de la machine.

$\Psi_{ssrr}(aa, bb, cc)$: Flux propres circulant au stator et au rotor de la machine.

$VV_{ssrr}(aa, bb, cc)$: Tensions simples triphasées au stator et au rotor de la machine. RR_{SS} : Résistance de l'enroulement statorique.

RR_{rr} : Résistance de l'enroulement rotorique.

Les équations des flux en fonction des courants s'obtiennent à partir de la matrice des inductances $[L(0)]$. Celle-ci comporte 36 coefficients non nuls, dont la moitié dépend du temps par l'intermédiaire de l'angle "électrique" $\theta\theta$, position de la phase (aa_{rr}) du rotor par rapport à la phase (aa_{ss}) du stator, figure II.1. L'angle électrique s'exprime $\theta\theta = nn_{pp}\theta\theta_{mm} n_o$

nn_{pp} : Le nombre de paires de pôles de la machine.

$\theta\theta_{mm}$: La position mécanique du rotor par rapport au stator.

$$\begin{aligned} \Psi_{ssss} & ll_{ss} MM_{ss}MM_{ss} MM_3 MM_2 ii_{ssss} \\ \Psi_{ssss} &= MM_{ss} ll_{ss} MM_1 MM_1 MM_3 ii_{ssss} \\ \Psi_{ssss} & MM_{ss} MM_{ss}MM_{ss} MM_2 3) \\ & MM_2 MM_1 ii_{ssss} \\ & ll_{ss} MM_3 \end{aligned} \quad (III.$$

$$\begin{aligned} \Psi'_{rrss} & MM_1 MM_2 MM_3 ll'_{rr} MM'_{rr}MM'_{rr} ii'_{rrss} \\ \Psi'_{rrss} &= MM_3 MM_1 MM_2 ll'_{rr} MM'_{rr} ii'_{rrss} \\ \Psi'_{rrss} & MM_2 MM_3 MM'_{rr} MM'_{rr} 4) \\ & MM_1 MM'_{rr} ll'_{rr} ii'_{rrss} \end{aligned} \quad (III.$$

avec :

$$MM'_1 = MM' \cos \theta\theta$$

$$MM'_2 = MM' \cos(\theta\theta - 2\pi\pi/3)$$

$$MM'_3 = MM' \cos(\theta\theta - 4\pi\pi/3)$$

ou MM' représente la valeur maximale des inductance mutuelles entres phases statoriques et

rotoriques. La matrice $[L(\theta\theta)]$ fait apparaître quatre sous-matrices d'inductance :

$$(III. 5) \quad \Psi_{sssssss} = [MM[LL'SSsrr] \quad [MM'ssrr]i'_{sssssss}$$

$$rrsssss \quad] \quad [LL'rr] ii'_{rrsssss}$$

✓ La matrice des inductances statoriques $[LL_{ss}]$:

$$[LL_{ss}] = \begin{bmatrix} l_{ss} & MM_{ss}MM_{ss} \\ MM_{ss} & l_{ss} \end{bmatrix}$$

(III. 6) $MM_{ss} \quad MM_{ss} \quad l_{ss}$

✓ La matrice des inductances rotoriques $[LL'_{rr}]$:

$$[LL'_{rr}] = \begin{bmatrix} l'_{rr} & MM'_{rr}MM'_{rr} \\ MM'_{rr} & l'_{rr} \end{bmatrix}$$

(III. 7) $MM'_{rr} \quad MM'_{rr} \quad l'_{rr}$

✓ La matrice des inductances mutuelles stator-rotor $[MM'_{ssrr}]$ et $[MM'_{rrss}]$ la matrice des inductances mutuelles rotor-stator :

$$[MM'_{ssrr}] = [MM'_{rrss}]^T$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta\theta - 2\pi\pi/3) & \cos(\theta\theta) \\ \cos(\theta\theta + 2\pi\pi/3) & \cos(\theta\theta - 2\pi\pi/3) \end{bmatrix}$$

(III. 8)

Les couplages en étoile des bobinages permettent d'introduire les relations :

$$\begin{cases} i_{sss} + i'_{sss} + i''_{sss} = 0 \\ ii'_{rrss} + ii'_{rrss} + ii'_{rrss} = 0 \end{cases}$$

(III. 9)

On obtient finalement :

$$[VV_{sssssss}] = [RR_{ss}] [ii_{sssssss}] + \{ [LL_{ss}] [ii_{sssssss}] + [MM'_{ssrr}] [ii'_{rrsssss}] \}$$

(III. 10)

$dddd$

$$\{[LL'_{rr}][i'_{rrsssss}] [MM'_{ssrr}]^T [i_{sssss}]\} [VV'_{rrsssss}] = - [RR'_{rr}][i'_{rrsssss}] + dddd^{dd} \quad (III. 11)$$

LL_{ss} : Coefficient d'inductance propre d'une phase statorique, MM_{ss} :
Coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases statoriques,

ll_{rr} : Coefficient d'inductance propre d'une phase rotorique,

MM'_{rr} : Coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques,

II.5.3-Couple électromagnétique :

Le couple est donné par l'expression suivante issue de considérations sur la conversion électromécanique de l'énergie :

$$T_{eemm} = pp [i_{ssss} i'_{ssss}] [MM_{ssrr}] i'_{rrss} \quad (III. 12)$$

II.5.4-Equation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_{eemm} - T_{rr} - ff\Omega \quad (III. 13)$$

Ω : Vitesse mécanique de la machine.

T_{eemm} : Couple électromagnétique.

ff : Coefficient de frottement visqueux.

T_{rr} : Couple résistant.

J : Moment d'inertie.

II.5.5-Equation de Park [34]:

L'application d'une double transformation de repère triphasé (abc) vers le repère biphasé ($\alpha\beta$) suivie par (dq), nous permet de simplifier notre model, et cette technique n'a pu être réalisé qu'on exploitant les propriétés de la transformé de Park.

$$V_{ssdd} = RR_{ss} i_{ssdd} + \frac{d\Psi_{ssdd}}{dt} - \omega \Psi_{ssss} \quad (III. 14)$$

$$V_{ssss} = R R S S i_{ssss} + \frac{d d \Psi_{rrdd}}{d t} - \omega \omega_{ssss}$$

$$V_{rrdd} = R R r r i_{rrdd} + \frac{d d \Psi_{rrdd}}{d t} - (\omega \omega_{ss} - \omega \omega) \Psi_{rrss}$$

$$V_{rrss} = R R r r i_{rrss} + \frac{d d \Psi_{rrss}}{d t} - (\omega \omega_{ss} - \omega \omega) \Psi_{rrdd}$$

Avec :

$$\Psi_{ssdd} = L L s s i_{ssdd} + L L m m i_{rrdd} \quad (III. 15)$$

$$\Psi_{ssss} = L L s s i_{ssss} + L L m m i_{rrss}$$

$$\Psi_{rrdd} = L L r r i_{rrdd} + L L m m i_{ssdd}$$

$$\Psi_{rrss} = L L r r i_{rrss} + L L m m i_{ssss}$$

Ainsi que le couple électromagnétique est donné par :

$$T T_{eem} = p p L L m m i_{rrdd} i_{ssss} - i_{rrdd} i_{ssdd} \quad (III. 16)$$

La matrice de Park est donnée par :

$$P P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (III. 17)$$

Le changement de variables relatifs aux courants, tensions et flux est défini par la transformation (II.17).

$$P P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (III. 18)$$

$$|\cos \theta \theta + 3 - \sin \theta \theta + 3| \text{ II.6}$$

Modélisation du redresseur :

Le redresseur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source alternative en une source continue. Dans notre cas d'étude, on s'intéresse seulement au redresseur triphasé parfait à double alternance non commandé dont les composants sont des diodes (Figure II.7) L'alimentation du redresseur se fait par le réseau électrique triphasé où le système de tension est équilibré [29].

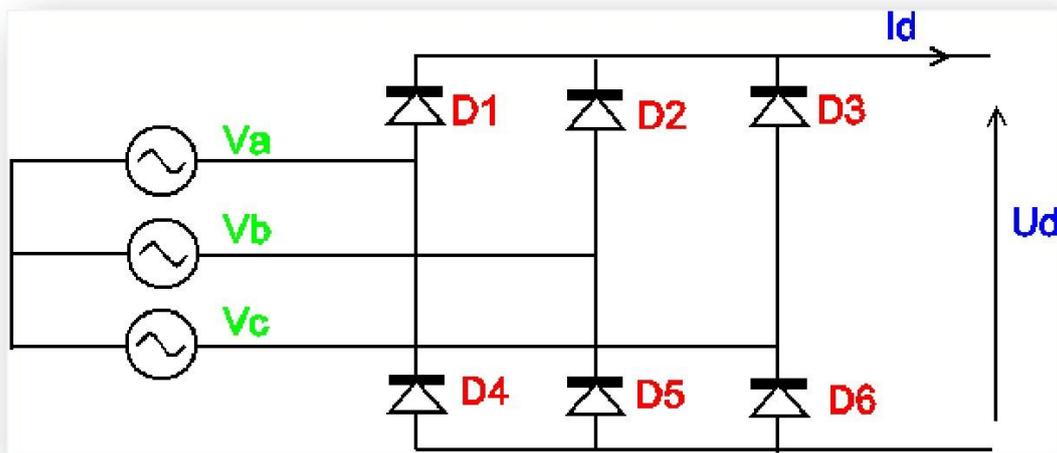


Figure II.8. Représentation du redresseur triphasé à diodes.

Ce redresseur comporte trois diodes \$D_1, D_2, D_3\$ à cathode commune assurant l'aller du courant \$I_d\$ et trois diodes \$D_4, D_5, D_6\$ à anode commune assurant le retour du courant \$I_d\$. Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré en tension :

$$\begin{cases} V_{ss}(dd) = V_{mm} \sin(2\pi f dd) \\ V_{ss}(dd) = V_{mm} \sin(2\pi f dd - 2\pi/3) \\ V_{ss}(dd) = V_{mm} \sin(2\pi f dd - 4\pi/3) \end{cases} \quad (III. 19)$$

Ensuite on a négligé l'effet d'empiètement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suit :

$$U_{dd} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m [\sin(\omega t) - \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})] d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (III. 20)$$

Et sa valeur moyenne est donnée par :

$$U_{dd} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (III. 21)$$

II.7-Modélisation de l'onduleur de tension : [30]

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques capables de transformer l'énergie d'une source continue en une source alternative. Cet onduleur est constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristors IGBT pour les grandes puissances.

II.7.1- Le Transistor IGBT :

Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) est un dispositif semi-conducteur de la famille des transistors qui est utilisé comme interrupteur électronique, principalement dans les montages de l'électronique de puissance.

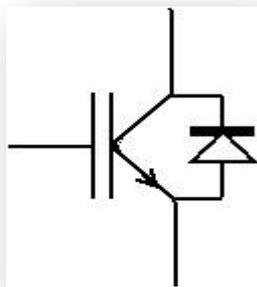


Figure II.9. Symbole usuel de l'IGBT.

II.7.2-Principe de fonctionnement

L'onduleur est composé de six transistors avec une diode montée en antiparallèle. Les transistors T1 et T1' comme T2 et T2' et T3 et T3' sont complémentaires en théorie que lorsque l'un deux est ouvert l'autre est fermé et inversement. On ouvrira donc l'un des transistors avant de fermer l'autre. Le temps de sécurité entre l'ouverture de l'un et la fermeture de l'autre est appelé « temps mort ». [30]

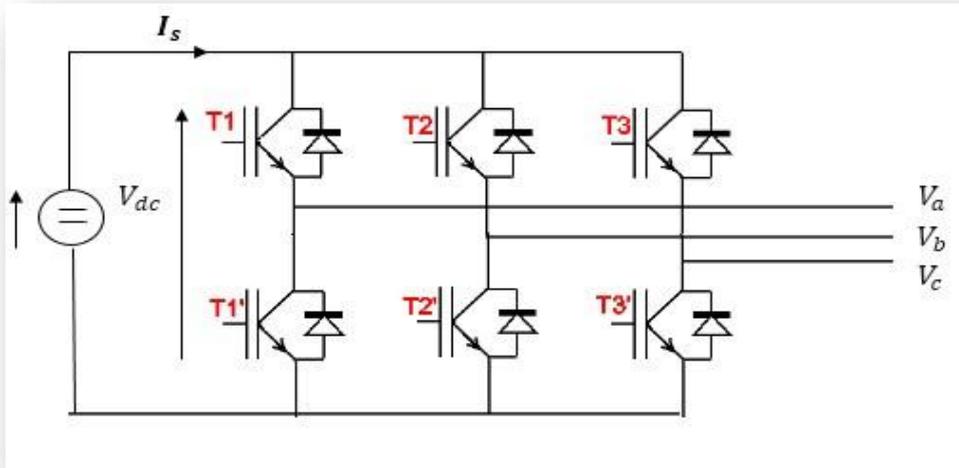


Figure II.10. Structure d'un onduleur de tension.

Pour simplifier l'étude nous supposons que : [35]

- ✓ La commutation des interrupteurs se fait instantanément ;
- ✓ La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable c'est-à-dire l'interrupteur supposé idéalisé ;
- ✓ La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Les trois tensions composées sont définies par les relations suivantes : V_{AABB} V_{BBAA} V_{AAAA} tel que :

$$V_{AAAA} = V_{AAAA} - V_{AAAA} \quad (III. 22)$$

$$V_{AABB} = V_{AAAA} - V_{BBAA}$$

$$V_{BBAA} = V_{BBAA} - V_{AAAA}$$

Le système V_{AAAA} V_{AABB} V_{BBAA} étant équilibré (

$V_{AAAA} + V_{AAAA} + V_{BBAA} = 0$), on aura donc :

$$V_{AAAA} = \frac{1}{3} (V_{AAAA} - V_{BBAA}) \quad (III. 23)$$

$$V_{AAAA} = \frac{1}{3} (V_{AABB} - V_{AAAA})$$

$$V_{BBAA} = \frac{1}{3} (V_{BBAA} - V_{AABB})$$

En remplaçant (III. 22) dans (III. 23) on obtient :

$$\begin{matrix} VV_{AA} & 1 & 2 & -1 & -1 & VV_{AAAA} \\ & & & 2 & -1 & VV_{BBAA} \\ VV_{BB} = & -1 & & -1 & & 24) \\ & 3 & & & & \\ VV_{CC} & & -1 & & 2 & VV_{CCAA} \end{matrix} \quad (III. 24)$$

Le système (III. 24) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI. Les tensions simples délivrées données par l'onduleur seront obtenues directement à partir des états des grandeurs de commande V_A , V_B et V_C qui représentent les signaux de commande des interrupteurs. Le modèle mathématique obtenu reste valide pour les deux modes de fonctionnement soit en onduleur où en redresseur.

Le tableau ci-dessous montre les expressions qui prennent les tensions simples et les tensions composées, en fonction de l'état ouvert ou fermé des interrupteurs k_1 , k_2 , k_3 (les états de k_4 , k_5 , k_6 sont respectivement complémentaires de ceux de k_1 , k_2 , k_3).

K_1	K_2	K_3	V_{a0}	V_{bn}	V_{cn}	V_A	V_B	V_C	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}
F	F	F	E/2	E/2	E/2	0	0	0	0	0	0
F	O	F	E/2	-E/2	E/2	E/3	-2E/3	E/3	E	E	0
F	F	O	E/2	E/2	-E/2	E/3	-E/3	-2E/3	0	E	-E
F	O	O	E/2	-E/2	-E/2	2E/3	-E/3	-E/3	E	0	-E
O	F	F	-E/2	E/2	E/2	-2E/3	E/3	E/3	-E	0	E
O	O	F	-E/2	-E/2	E/2	-E/3	-E/3	2E/3	0	-E	E
O	F	O	-E/2	E/2	-E/2	-E/3	2E/3	-E/3	-E	E	0
O	O	O	-E/2	-E/2	-E/2	0	0	0	0	0	0

Tableau II.1. Calcul les vecteurs des tensions [35]

II.8-Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

La modulation triangle-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersective puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangle-sinusoïdale. Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance. [31]

Le schéma de principe est donné par la figure suivante :

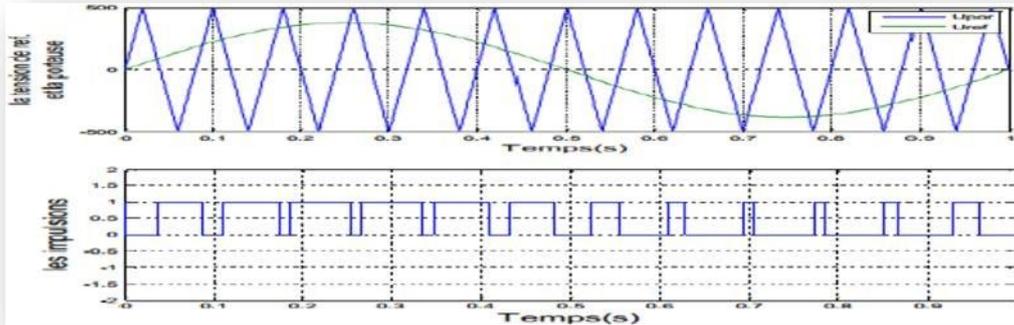


Figure II.11. Principe de la commande MLI_ sinus_triangle

II.8.1-Equation de la référence :

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude « V_{rr} » et de fréquence « f_{rr} ». En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par : [31]

$$\begin{cases} V_{rrAA}(dd) = V_{rr} \sin(2\pi f_{rr} dd) \\ V_{rrBB}(dd) = V_{rr} \sin(2\pi f_{rr} dd - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (III. 22)$$

La fonction logique S_{jj} associée au signal de commande est définie par :

$$\begin{cases} 1 & S_{ii} V_{rrAAAABB} - M(dd) \geq 0 \\ S_{123} = \\ 0 & V(dd) = V \sin(2\pi f dd - 4\pi) \end{cases} \quad (III. 23)$$

$$0 \quad S_{ii} V_{rrAAAABB} - M(dd) < 0$$

II.8.2-Equation de la porteuse :

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence f_{pp} et sa valeur de crête V_{pp} .

On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0, T_{pp}]$ par :

$$\begin{cases} x_{11}(dd) = V_{pp} - 1 + 4 \frac{dd}{T_{pp}} \quad S_{ii} dd \in [0, T_{pp}] \end{cases} \quad (III. 24)$$

$$\left\{ x_2(d) = V_p \left(3 + 4 \frac{d}{T_p} \right) \quad \text{ssd} \epsilon \frac{T_p}{2}, T_p \right.$$

II.9-Bus continu :

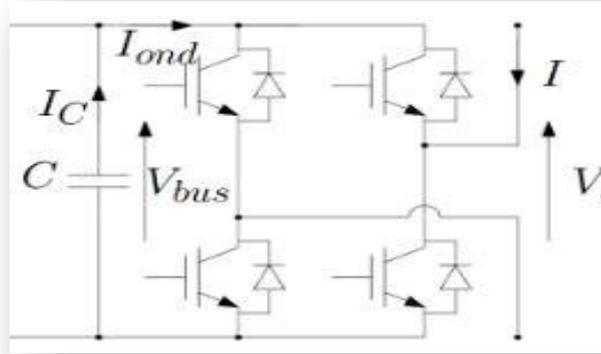


Figure II.12. Modèle considéré pour dimensionner le bus. [36]

On a alors une manière simple de dimensionner le bus DC : [36]

$$C_{ssbss} = \frac{I}{8.11\pi\sqrt{f}r\Delta V}$$

ΔV : l'ondulation crête en Volts

I : la valeur efficace du courant de ligne en Ampères

C_{ssbss} : la valeur en farads du bus DC

r : la profondeur de modulation, généralement $r < 0.90$.

Le schéma de principe de Bus continu est donné par Figure II.13. [32]:

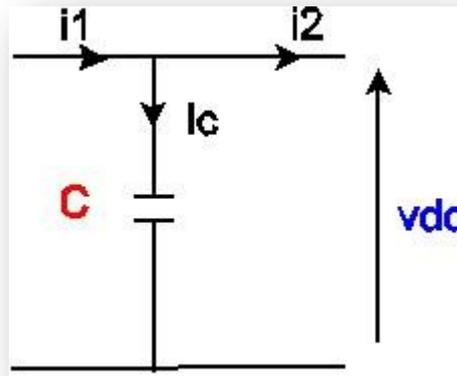


Figure II.13. Schéma électrique du bus continu

Le courant du condensateur est d'un nœud ou circulent deux courant modules par convertisseur:

$$i_{ss} = i_{rred} - i_{ooAAd} \quad (III. 32)$$

i_{ss} : Le courant de charge du condensateur.

i_{rred} : Le courant redressé.

i_{ooAAd} : Le courant ondulé.

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est exprimée par l'équation suivante :

$$\frac{du_{ss}}{dt} = \frac{1}{C} i_{ss} \quad (III.33) \quad dddd \quad CC$$

II.10- Circuit RL série

Le circuit du filtre RL série est présenté dans la figure II.14, l'entrée du circuit est une tension sinusoïdale de fréquence variable. La sortie du circuit est la tension aux bornes de la résistance, il relie le convertisseur au réseau, constitué d'une inductance « L » et résistance « R ».

II.11-Rappel sur le modèle de la MADA [37] :

La synthèse de la commande vectorielle se fera sur la base du modèle simplifié de la figure II.14 (c'est à dire celui établi en négligeant la résistance d'une phase statorique avec orientation du flux statorique) et non pas sur le modèle réel de la machine.

Dans ce schéma, les termes de couplage sont désignés par C_d , C_q et les f.e.m par F_d et F_q . Nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné que chaque axe peut être commandé indépendamment avec des régulateurs indépendants. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe « q » rotorique et la puissance réactive pour l'axe « d » rotorique.

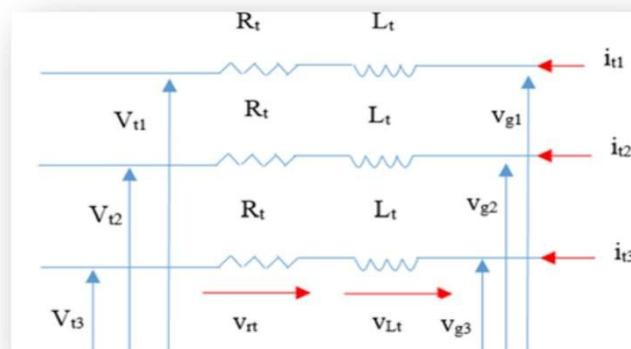


Figure II.14 : Filtre RL série

II.12 Technique d'orientation du flux :

Elle consiste à orienter le flux statoriques sur l'axe

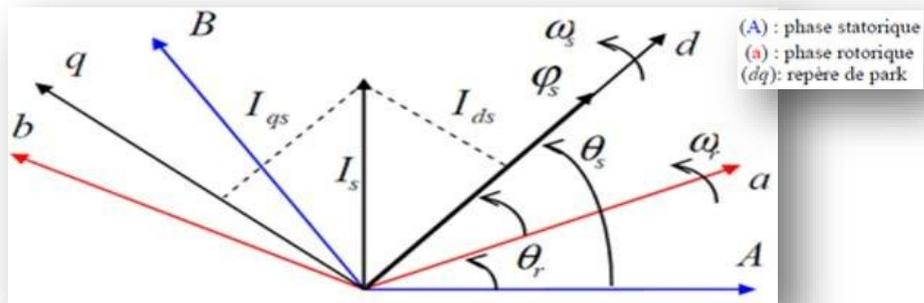


Figure II.15 : Orientation de l'axe d sur le flux statoriques

On a donc :

$$\varphi_{dss} = \varphi_{ss} \text{ et } \varphi_{sss} = 0 \quad (III. 34)$$

On néglige la résistance statoriques pour les machines de moyen ou forte puissance :

$R_s=0$ Donc :

$$35) \quad V_{dss} = 0 \quad (III. 35)$$

En posant que le flux statoriques constant, on obtient les équations de tension statorique suivants :

$$V_{dss} = 0$$

$$V_{sss} = V_{ss}$$

Où :

$$\begin{cases} V_{dss} = 0 \\ V_{sss} = V_{ss} = \omega_s \varphi_{ss} \\ \varphi_{dss} = L_{ss} \cdot i_{dss} + M_{sd} \cdot i_{drr} \end{cases} \quad (III. 36)$$

$$0 = L_{ss} \cdot i_{dss} + L_{mm} \cdot i_{srr}$$

On trouve d'après l'équation (III. 36) les équations des courants statoriques :

$$i_{dss} = \frac{L_{mm} \cdot i_{srr}}{L_{ss} - L_{mm}} \quad (III. 36)$$

$$i_{sss} = \frac{-L_{mm}}{L_{ss}} i_{srr}$$

Les puissances statoriques s'expriment comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} PP_{ss} = VV_{ddss}i_{ddss} + VV_{ssss}i_{ssss} \\ (III. 37) \end{array} \right.$$

$$QQ_{ss} = VV_{ssss}i_{ddss} + VV_{ddss}i_{ssss}$$

D'après l'équation de (III. 38) on obtient les équations statoriques de P et Q suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} PP = VV_{ss} II_{ssss} \\ QQ = VV_{ss} II_{ddss} \end{array} \right.$$

En remplaçant (III. 36) dans (III. 37): $-LL_{mm}$ (III. 39)

$$\left\{ \begin{array}{l} PP_{ss} = -VV_{ss} LL_{dd} i_{ssrr} \\ QQ_{ss} = -VV_{ss} \varphi_{ss} - MMVV_{ss} i_{ddrr} \\ LL_{ss} \quad LL_{ss} \end{array} \right.$$

En remplaçant φ_{ss} par Vs/ω donc l'expression de la puissance réactive Q devient alors :

$$QQ_{ss} = \omega \omega \frac{VV_{dd}^2}{\omega} LL_{dd} - LL_{mm} LL_{dd} VV_{dd} i_{ddrr} \quad (III. 39)$$

Si on considère l'inductance magnétisante M constante, alors le système lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au

courant rotorique d'axe d a une constante près $\omega \omega \frac{VV_{dd}^2}{\omega} LL_{dd}$ imposé par le réseau :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ddrr} = LL_{rr} - \frac{LL_{LL} mm_{dd}^2}{\omega} i_{ddrr} + \frac{LL_{LL} mm_{dd} \omega}{\omega} VV_{dd} \\ (III. 40) \\ LL_{mm2} \end{array} \right.$$

$$\varphi_{ddrr} = LL_{rr} - \frac{LL_{ss}}{\omega} i_{ssrr}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} VV_{ddrr} \\ (III. 40) \end{array} \right. = RR_{rr} i_{ddrr} + LL_{rr} - \frac{LL_{LL} mm_{dd}^2}{\omega} i_{ddrr} - gg \omega \omega_{ss} LL_{rr} - \frac{LL_{LL} mm_{dd}^2}{\omega} i_{ssrr} \quad (40)$$

$$VV_{ssrr} = RR_{rr} i_{ssrr} + LL_{rr} - \frac{LL_{mm2} dd}{LL_{ss} dddd} i_{ssrr} - \omega \omega_{ss} LL_{rr} - \frac{LL_{mm2}}{LL_{ss}} i_{ddrr} + \frac{LL_{mm} VV_{ss}}{LL_{ss} \omega \omega_{ss}}$$

Les équations précédentes permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler donné par la figure si dessous :

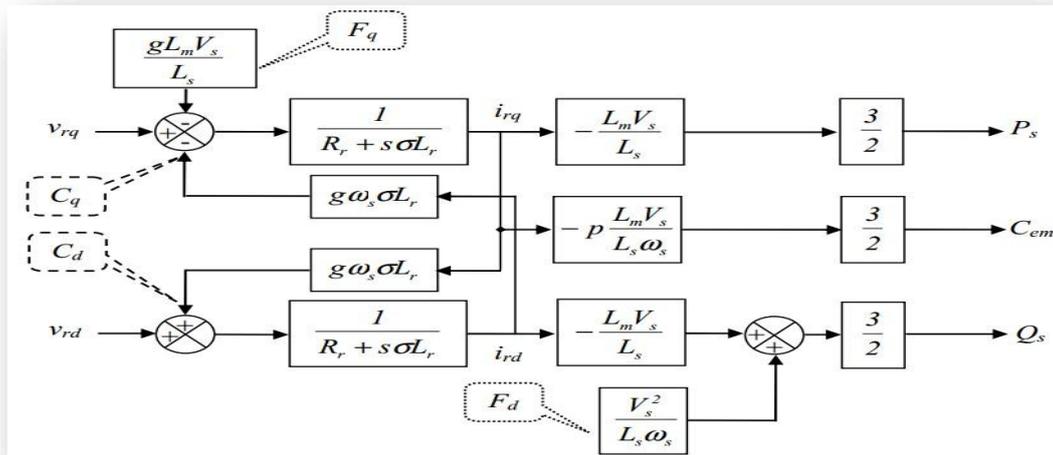


Figure II.16. Schéma bloc du système à commander.

II.13 La commande directe :

Cette commande directe utilise deux grandeurs nécessaires qui sont le module du flux et sa position, ces derniers ne sont pas mesurables directement. Cette méthode est appelée commande directe parce que les grandeurs utilisées contrôlent les tensions rotorique de la machine d'une façon directe; il consiste à utiliser un régulateur sur chaque axe pour contrôler la puissance active et réactive de façon indépendante, en place les termes de couplage qui sont négligé [33].

La figure II.17 représente le schéma bloc de la commande directe en puissance de la machine asynchrone à double alimentation.

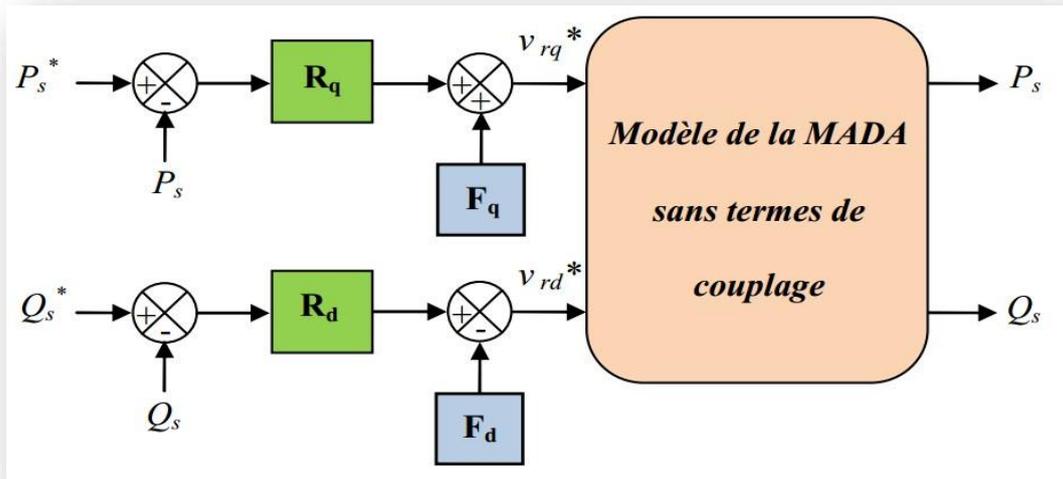


Figure II.17. Schéma bloc de la commande directe de la MADA [37]

Avec R_q et R_d sont les régulateurs de la puissance active et réactive respectivement, ils ont été choisis de type PI classique. F_d et F_q sont des termes de compensation qui ont pour expressions :

$$FF_{dd} = \frac{3VV_{ss2}}{2LL_{ss}\omega\omega_{ss}}$$

$$FF_{ss} = \frac{ggLL_{mm}VV_{ss}}{LL_{ss}}$$

II.14 Commande du convertisseur cote réseau [13]:

Le convertisseur cote réseau présente dans la figure II.18 et connecté entre bu continu et le réseau électrique a travers un filtre R-L. le rôle ce convertisseur le maintien la tension constante aux borne du Buc continu et la direction du flux d'énergie rotorique dan MADA.

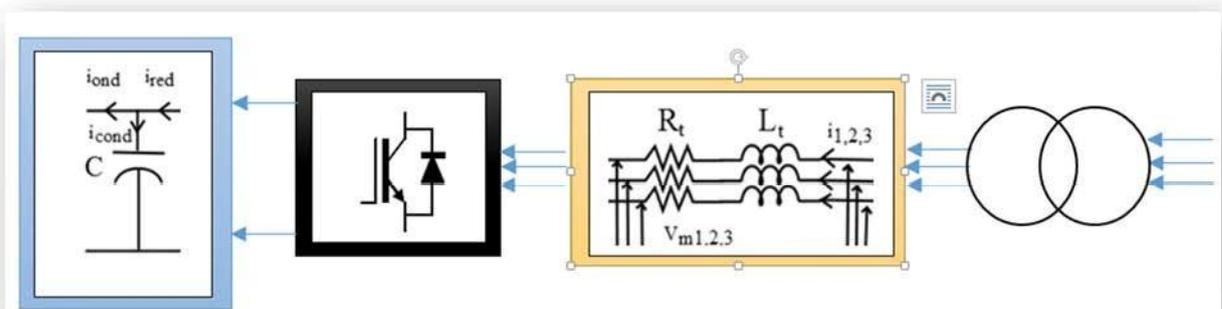


Figure II.18 : connexion du CCR réseau [13]

II.15 Synthèse du régulateur :

II.15.1 Régulateur PI :

Le correcteur est une combinaison des deux actions proportionnelles et intégrales (PI) dont la fonction de transfert est de la forme $[K_p + \frac{K_i}{s}]$, le régulateur classique permet de contrôler la précision et la rapidité des systèmes asservis.

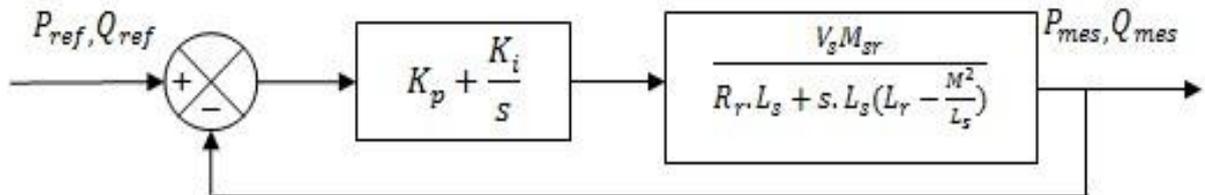


Figure II.19 : Boucle de régulation de la vitesse mécanique.

La fonction de transfert obtenue en boucle ouverte est définie par :

$$FTBO = \frac{K_p + \frac{K_i}{s}}{R_r L_s + s L_s (L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (III. 41)$$

Alors Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert ce qui est traduit par l'égalité suivante :

$$K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (III. 42)$$

Donc on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p s + K_i}{s (R_r L_s + s L_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}))} \quad (III. 43)$$

La FTBF donne:

$$K_{pp} = \frac{1}{\tau_{rr}} \frac{L_{ss} (L_{rr} - \frac{L_{LL} L_{ss}}{L_{mm}^2})}{V_{ss} L_{mm}} \quad (III. 44)$$

Avec τ_{rr} le temps de réponse du système que l'on fixe à l'ordre de 200 ms. On peut exprimer les gains de correcteur en fonction de paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_{ii} = \frac{1}{\tau_{rr}} \frac{L_{ss} L_{LL}}{V_{ss} L_{mm}}$$

$$K_{pp} = \frac{1}{\tau_{rr}} \frac{L_{ss} (L_{rr} - \frac{L_{LL} L_{ss}}{L_{mm}^2})}{V_{ss} L_{mm}} \quad (III. 45)$$

Résultat de simulation :

On se propose d'effectuer sous environnement Matlab/Simulink, Sim Power System, la simulation de notre model (Annexe 02)

I.11 : Interprétations des résultats :

Les résultats de simulation de la génératrice asynchrone à double alimentation et présentée sur les figures (II.21), (II.22), (II.23), (II.24), (II.25), (II.26), concernant respectivement la

puissance active et la puissance réactive, le couple électromagnétique, la vitesse et les composantes des courants statoriques et les courant rotorique.

Figure II.21 : Puissance active (Watt) avec régulateur PI

On remarque que la puissance active présente un régime transitoire qui est fixé après une durée de 3s avec des pics, à l'application d'échelon (la consigne) à $t = 6$ s au système tel que la puissance passe de 0 à -2 MW, remarquons aussi un suivie de consigne sur la même figure montre que la puissance débitée par la MADA atteint bien la valeur désirée de - 2MW seulement elle présente des perturbations avec un dépassement dû à l'application d'une variation puissance réactive à $t=4$ s.

FigureII.22 : Puissance réactive Q (VAR) avec régulateur PI

On remarque que la puissance réactive présente un régime transitoire qui est fixé après une durée de 3s avec des pics, à l'application d'échelon (la consigne) à $t = 4$ s au système tel que la puissance passe de 0 à -2 MW, remarquons aussi un suivie de consigne sur la même figure montre que la puissance débitée par la MADA atteint bien la valeur désirée -2MW sauf une perturbation (dépassement) dû à l'application d'une puissance active à $t=6$ s.

Figure II.23 : Le couple électromagnétique T_{em} (N.m) avec régulateur PI

La figure II.19 représente l'évolution de couple électromagnétique de notre système, qui suite à l'application d'une variation de puissance active de -2 MW à $t=6$ s et pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est négatif, il atteint au démarrage une valeur maximale de 5.10^3 (N.m).

Figure II.24 : La vitesse (rad/s) avec régulateur PI

De 0 à 0.4s, la MADA fonctionne en hypo-synchrone et de 6 à 10 s, la vitesse de rotation est supérieure à la vitesse de synchronisme, notre MADA fonctionne en mode hyper-synchrone.

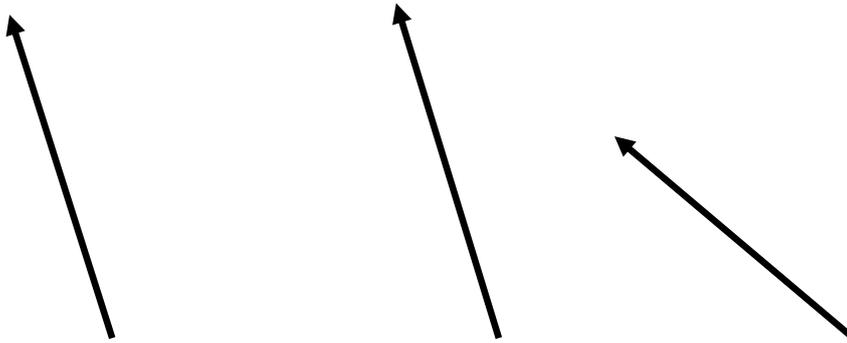


Figure II.25 : Courants statoriques I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} (A) avec régulateur PI

La figure II.25 représente le courant statoriques sont sinusoïdaux, on remarque que les amplitudes augmentent à $t=2s$ à cause de la variation de la puissance active et à $t= 4s$ à cause de la variation de la puissance réactive.

Figure II.26: Courants rotorique I_{ra} , I_{rb} , I_{rc} (A) avec régulateur PI.

La figure II.26 Représente les courants rotorique sinusoïdaux, on a une variation qui représente l'évolution des courants de notre système, qui suite à l'application d'une variation de puissance active de -2 MW à $t=2$ s, notre signale de courant présente une augmentation d'amplitude de 5630 A. et a $t=4s$. à l'application une variation de puissance réactivé de -2 MW, notre signale de courant présente une augmentation d'amplitude de 7400 A.

Figure II.27 : Zoom courants rotorique

La figure II.27 représente le régime de fonctionnement de notre génératrice passe d'un mode hyper-synchrone vers le mode hypo-synchrone, à l'instant $t= 6$ s suite à quoi l'évolution de notre courant rotorique est présentant un changement dans l'amplitude et la fréquence.

Conclusion :

Après avoir présenté la structure de la MADA, exposé ses différents modes de fonctionnement, énumérés ses avantages et inconvénients, nous avons présenté son model. Notre étude à traité le cas d'un aérogénérateur d'une puissance de 2MW à vitesse variable avec MADA. Il s'en est suivi une étude comparative sur les performances des régulateurs avec une commande directe de la génératrice.

Après une série de simulation sous environnement Matlab-Simulink SimPower System, nous avons confirmé le découplage des puissances en plus du fait que les résultats obtenues pour le cas d'un régulateur PI classique donne des résultats très satisfaisants pour la commande directe de la MADA. Cependant, il est à signalé que le régulateur PI neuronal nécessite plus de réglage qui pourrait se faire lors des travaux futurs. Nous venons de valider le model d'un aérogénérateur constitué d'une génératrice à double alimentation couplé à une turbine.

Y-a-t-il un intérêt à exploiter de nouveaux régulateurs pour avoir de meilleur performance ? Pour cela, on se propose d'utiliser d'autre régulateurs dans le chapitre suivant pour confirmer ou infirmer l'intérêt de ce choix.

Chapitre III

Etude comparative de différent régulateurs

III.1 Régulateur PI neuronal III.1.1

Introduction :

Les réseaux de neurones artificiels, sont des modèles inspirés du fonctionnement cérébral de l'être humain et de ses capacités d'apprentissage en exploitant le concept de neurone formel. Ce sont des structures organisées autour d'un ensemble de cellules appelé neurones

interconnectées par des liens pondérés et modifiables lors d'une procédure appelée apprentissage. Ils sont très efficaces à résoudre les problèmes de modélisation, d'identification et de contrôle des processus non linéaires et complexes. **III.1.2 Neurone formel :**

La première version du formulaire neuronal est celle de Mc Culloche et Pitts datée de 1943. Le neurone formel est un processeur qui se comporte comme le fonctionnement d'un neurone biologique, Figure. III-1 [38]

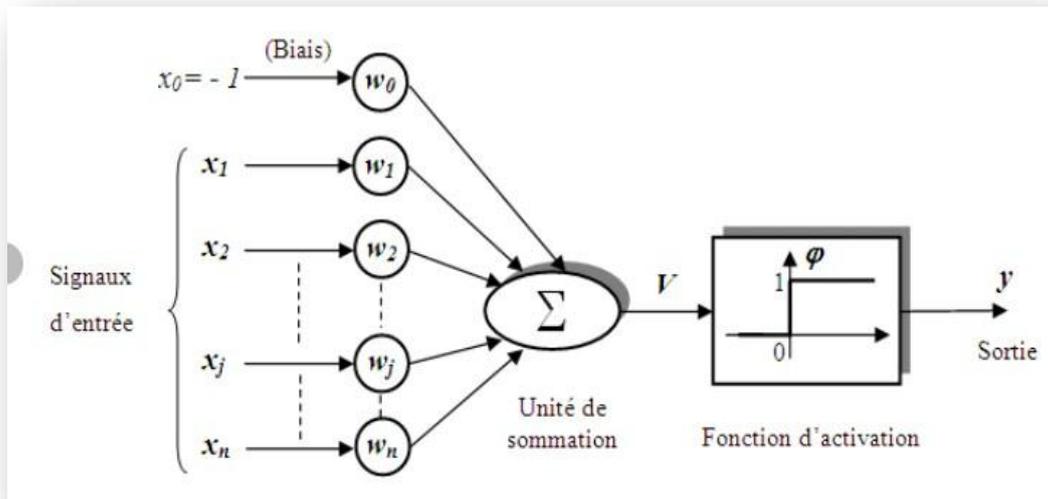


Figure III.1. Modèle du neurone formel de Mac Culloch et Pitts avec biais.

x_i : représente le vecteur d'entrée. w_j sont les poids synaptiques du neurone.

Ces poids pondèrent les entrées et peuvent être modifiés par apprentissage.

$$y = \sum_{i=1}^n w_{ji} x_i \quad (III.1)$$

Ce champ est additionné d'une constante, appelée biais « b_i » puis traité par une fonction d'activation pour donner la sortie du neurone :

$$y = \varphi(\sum x_i + b_i) \quad (III.2)$$

La fonction d'activation peut être linéaire ou non, la Figure III-2 illustre les types les plus répandus. Le choix des fonctions à utiliser est intimement lié au problème à résoudre.

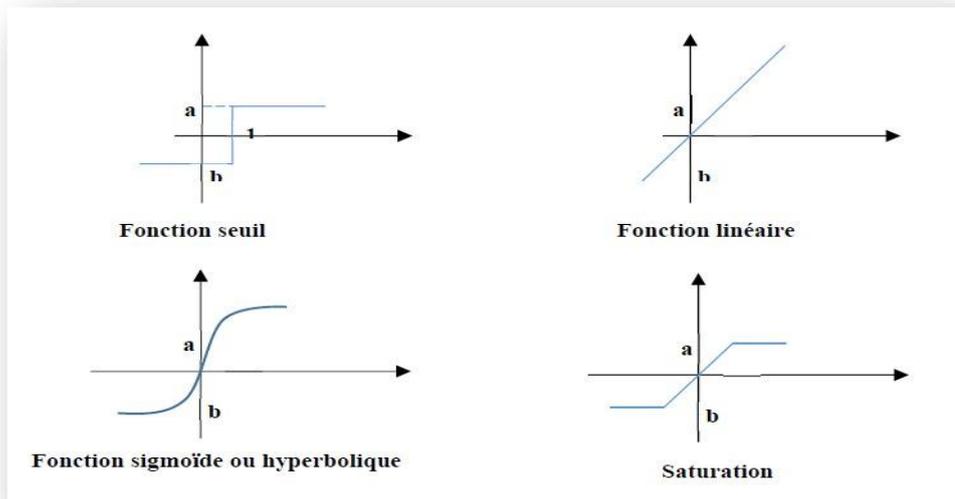


Figure III.2 : Différents types de fonctions d'activation

III.1.3-Architecture de réseaux de neurones :

L'organisation des réseaux de neurones peut se faire à partir de deux grandes catégories d'architecture: les réseaux statiques et les réseaux dynamiques [38].

III.1.4-Réseau dynamique :

Les réseaux de neurone bouclés sont utilisés pour la modélisation dynamique de processus non-linéaires et pour leur commande. [38]

Ces réseaux récurrents sont au contraire des réseaux statiques, ils peuvent avoir une topologie de connexion quelconque (autrement dit un réseau totalement connecté) comprenant des boucles. L'état global dépend aussi de ses états précédents comme indiqué sur la Figure III-3.

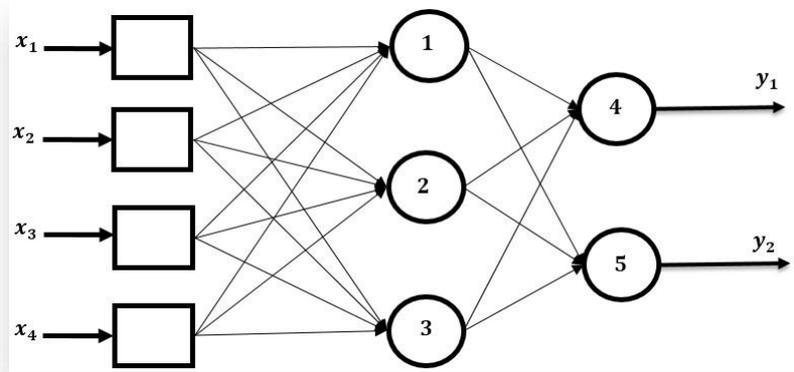


Figure III.3 : Représentation d'un réseau de neurones non bouclés [3]

III.1.5-Réseaux statiques:

Un réseau de neurones non bouclé (appelé aussi statique) est représenté comme un graphe dont les nœuds sont les neurones. L'information circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière (Figure III.4). Ce type de réseaux est utilisé pour effectuer des tâches d'approximation de fonction non linéaire, de la classification ou de la modélisation de processus statiques non

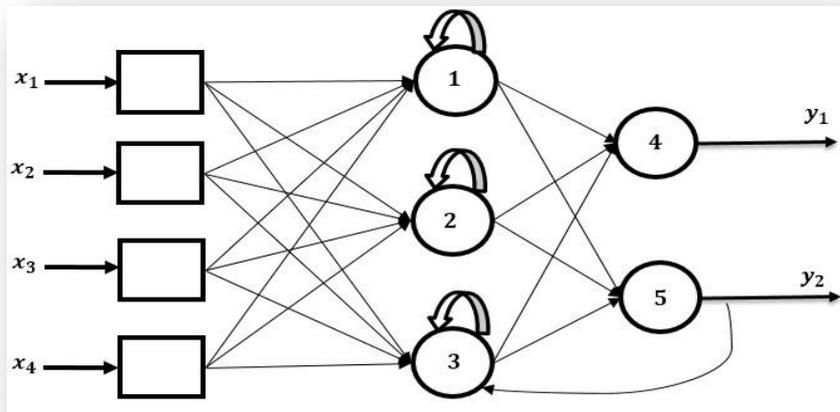


Figure III.4: Représentation d'un Réseaux de neurones bouclés.
linéaires [39].

III.1.6-Apprentissage des réseaux de neurones :

La phase d'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus importante et intéressante dans les réseaux de neurones, elle est suivie d'une mémorisation qui consiste à modifier les poids des connexions jusqu'à ce que les poids ne se modifient plus que d'une façon infime autrement dit jusqu'à l'obtention du comportement désiré[39].

III.1.7-Type d'apprentissage :

Les procédures d'apprentissage peuvent se subdiviser, elles aussi, en deux grandes catégories : apprentissage supervisé ou apprentissage non supervisé.

- ✓ **Apprentissage supervisé:** Ce type d'apprentissage minimise l'erreur entre les sorties désirées et les sorties obtenues.
- ✓ **Apprentissage non supervisé :** Le réseau doit détecter des points communs pour fournir la même sortie pour des entrées ayant des caractéristiques proches.
- ✓ **Base d'apprentissage**
Exemples représentatifs du comportement ou de la fonction à modéliser. Ces exemples sont sous la forme de couples (entrée ; sortie) connus.

La loi de Hebb :

- ✓ S'applique aux connexions entre deux neurones ✓ Règle de Hebb :

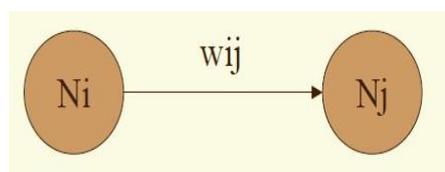
$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \mu x_i y_j \quad (III.3)$$

- ✓ Elle indique que La modification de poids dépend de la co-activation des neurones présynaptiques et post-synaptiques Elle peut être modélisée comme suit :

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \delta w_{ij}(k)$$

$$\delta w_{ij}(k) = x_i y_j \quad (III.4)$$

$$(III.5)$$



- ✓ n entrées x_1, x_2, \dots, x_n ✓ m neurones 1, ..., m.
- ✓ w_{ij} le coefficient synaptique de la liaison entre les neurones i et j
- ✓ V le potentiel synaptique

- ✓ une sortie y (ou o)
- ✓ un seuil S
- ✓ Fonction de transfert : fonction Signe si $y > 0$: $\text{Signe}(V) = +1$ si $y \leq 0$: $\text{Signe}(V) = -1$

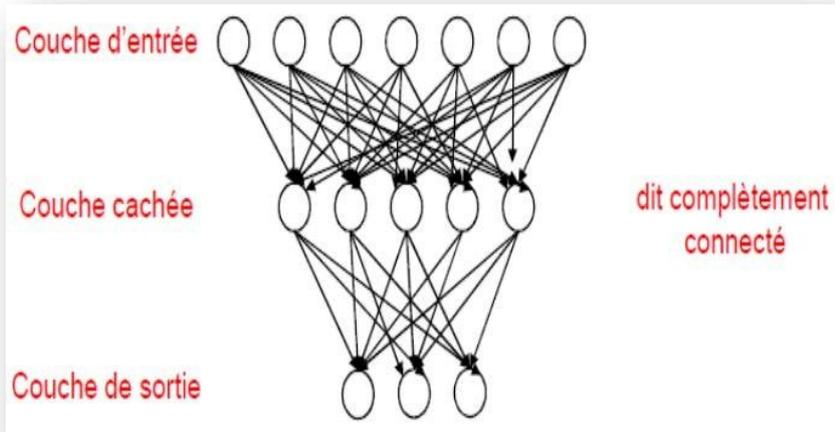
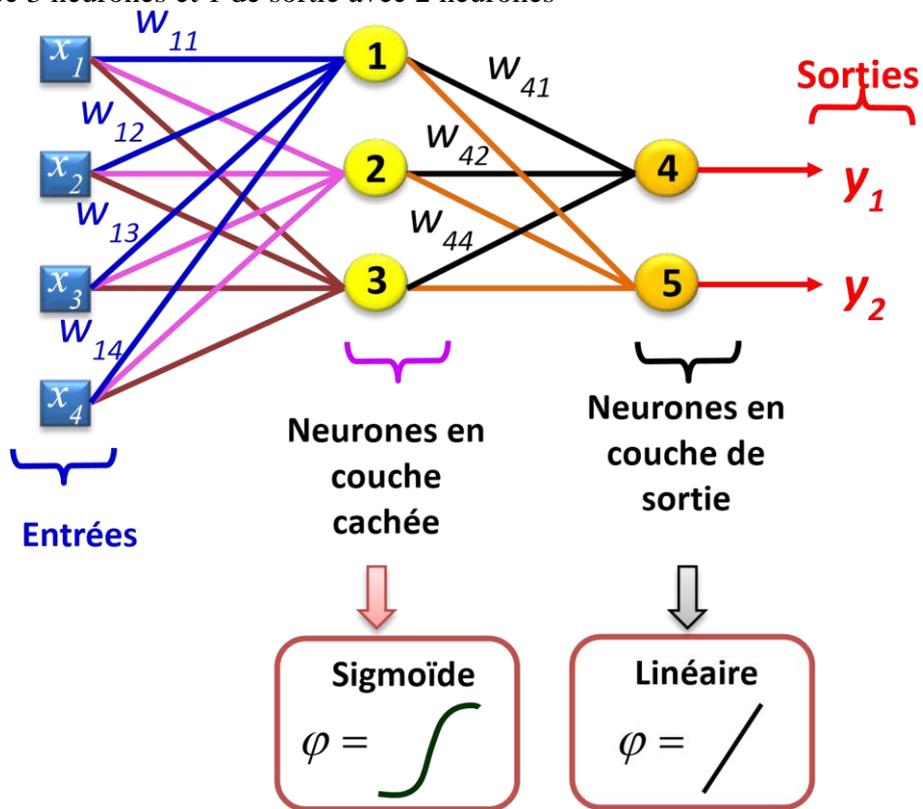


Figure III.5. Structure de perceptron multicouche

Exemple : réseau à 4 entrées / 2 couches:

1 cachée avec 3 neurones et 1 de sortie avec 2 neurones



Les poids sont toujours incrémentés selon la règle :

« $\mu \cdot \text{erreur en sortie} \cdot f'(\text{somme des entrées}) \cdot \text{entrée du lien}$ »

La fonction d'activation est une sigmoïde

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad f'(x) = f(x) \cdot [1 - f(x)] \quad (III.6)$$

Calcul la sortie d'un neurone

$$NN=2$$

$$o_{jj} = \sum_{i=1}^{NN} x_{ij} \cdot w_{ij} + w_{bbj}$$

$$(III.7)$$

Mise à jour des poids synaptiques

$$NN=2$$

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \mu \cdot e_{jj} \cdot f'(x_{ij}) \cdot w_{ij} + w_{bbj} \cdot x_{ij} \quad (III.8)$$

III.2. La commande H_∞ : [40][41]

III.2.1. Introduction :

La synthèse H_∞ est une méthode qui sert à la conception de commandes optimales. Il s'agit essentiellement d'une méthode d'optimisation, qui prend en compte une définition mathématique des contraintes en ce qui concerne le comportement attendu en boucle fermée. La commande H_∞ a pour principal avantage la capacité d'inclure dans un même effort de synthèse les concepts liés à la commande classique et à la commande robuste.

Le mot « optimal » est utilisé dans son sens strictement mathématique car la commande synthétisée est celle qui minimisera l'effet des entrées/sorties du système, ce qui peut être vu comme "non optimal" par les opérateurs (l'optimisation étant relative à l'objectif recherché).

Le « infini » dans H_∞ signifie que ce type de commande est conçu pour imposer des restrictions de type minimax au sens de la théorie de la décision (minimiser la perte maximale possible) dans le domaine fréquentiel. La norme H_∞ d'un système dynamique est l'amplification maximale que le système peut exercer sur l'énergie du signal d'entrée.

III.2.2 La commande H_∞ :

$$\begin{aligned} ZZ(ss) &= PP_{eeww}(ss)WW(ss) + PP_{eeee}(ss)KK(ss)YY(ss) \\ YY(ss) &= PP_{yyww}(ss)WW(ss) + PP_{yyee}(ss)KK(ss)YY(ss) \end{aligned} \quad (IIIIII. 12)$$

$$YY(ss) = \mathbf{11} - PP_{yyee}(ss) KK(ss) PP_{yyww}(ss) WW(ss)$$

$$ZZ(ss) = PP_{eeww}(ss)WW(ss) + PP_{eeee}(ss) KK(ss)II - PP_{yyee}(ss) KK(ss) PP_{yyww}(ss) WW(ss)$$

$$FFuPP(ss), KK(ss) \quad (IIIIII. 13)$$

$$= PP_{eeww}(ss) + PP_{eeee}(ss) KK(ss) II - PP_{yyee}(ss) KK(ss) PP_{yyww}(ss)$$

III.3 Synthèse du correcteur robuste H_∞ :

La synthèse H_∞ du correcteur réalise de l'objet linéaire de commande et d'observation dans l'espace d'état de la matrice d'interconnexion $P(s)$, exprimé par :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1u_1 + B_2u_2 \\ z_1 = C_1x + D_{11}u_1 + D_{12}u_2 \\ z_2 = C_2x + D_{21}u_1 + D_{22}u_2 \end{cases} \quad (IIIIII. 14)$$

III.4 L'équation de Riccati :

Le matrice $PP = PP^T$, $QQ = QQ'$ mêmes dimensions que A

$$X = Ric \begin{pmatrix} A & -P \\ -Q & -A^T \end{pmatrix} \quad (IIIIII. 15)$$

La solution symétrique de l'équation de Riccati:

$$(IIIIII. 16) \quad X A + A^T X - X P X + Q = 0$$

Toutes les valeurs propres de « $AA - PPXX$ » ont une partie réelle strictement négative.
 Pour résoudre le problème H_∞ standard, on suppose satisfaites les hypothèses suivantes:

H1 (A, Bu) est stabilisable et (A, Cy) est détectable

H2 $\text{Rang}(De_u) = n_e$ et $\text{rang}(Dy_w) = n_y$

H3 $\forall \omega \in \mathbb{R} \quad \begin{bmatrix} r & r & r & r & n & n & r & r \\ C & C & e & e & A & A - j\omega w & I & n \end{bmatrix}$

H4 $DD_{euee} BB_{ee} = n + n_{nee}$

$\forall \omega \in \mathbb{R} \quad \begin{bmatrix} r & r & r & r & n & n & r & r \\ A & A - j\omega w & I & n & B & B & w & w \\ = n + n_{yy} & & C & C & y & & D & D & w & w & y & y \end{bmatrix}$

H1: est l'hypothèse classique de toute méthode de synthèse utilisant les variables d'état (commande modale par exemple) : elle est nécessaire pour obtenir la stabilité du système bouclé.

H2 : est une condition suffisante pour que la matrice de transfert du correcteur soit propre. Remarquons que le fait d'avoir DD_{euee} de rang complet signifie que toutes les commandes interviennent dans les variables régulées e . Par ailleurs, H2 suppose implicitement que $n_{nee} \geq n_{nee}$ et $n_{nww} \geq n_{nyy}$.

H3 : entraîne que $PP_{euee}(ss)$ n'a pas de zéro sur l'axe imaginaire (mais la réciproque n'est pas vraie si la représentation d'état utilisée pour décrire $PP_{euee}(ss)$ n'est pas minimale). De même

pour H4 et $PP_{yyww}(ss)$.

III.5 Mise en œuvre :

III.5.1 Mise en forme pour la synthèse :

Peut être considéré comme l'un des problèmes de la synthèse H_∞ comme suite Figure III.7

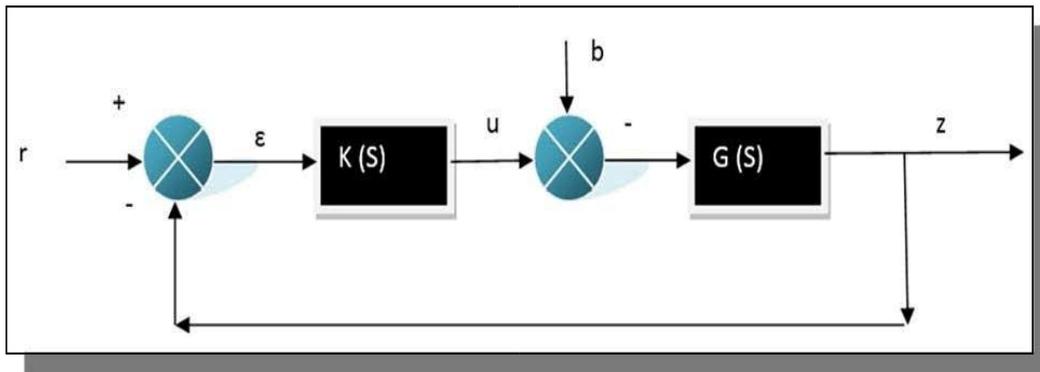


Figure III.7 : Analyse d'un système asservi [13]

- $G(s)$ est un modèle du système à asservir.
- $K(s)$ le correcteur à déterminer.
- Asservir la sortie z sur la référence r .
- Le signal b est une perturbation.

Le problème C'et chercher un nombre $\gamma > 0$ et le correcteur $K(s)$ stabilisant le système bouclé.

$$\|MM\|_{\infty} = KKSS^{SS} KKSSSS^{SSSS} < \gamma \quad (IIIII. 17)$$

III.5.2 Mise en œuvre par l'introduction de fonctions de pondération :

W1, 2, 3: Fonctions des pondérations.

La Figure III.8 représente le système augmenté par les fonctions des pondérations.

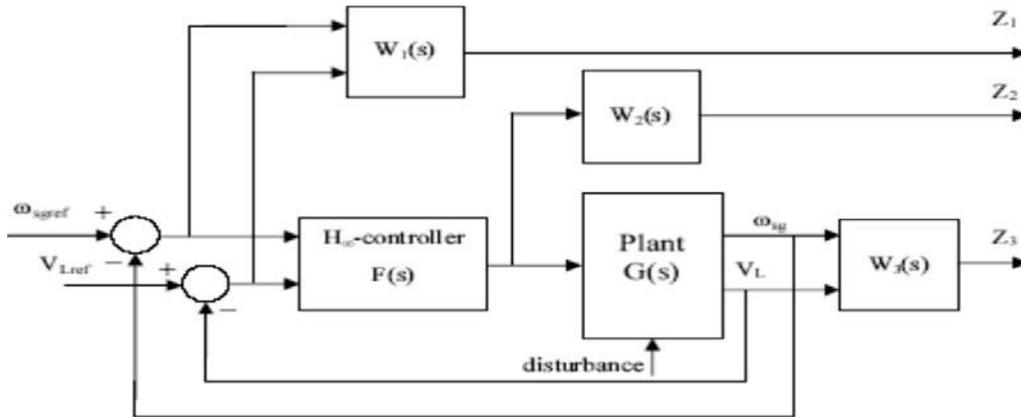


Figure III.8 Diagramme de block simplifié de plant augmenté.

$$wwSS_{22}wwKKSS^{11}ww^{ww}_{22}^{11}KKSSSS^{SSSS}ww_{ww}^{33}_{33} < \gamma\gamma$$

(III.18)

III.6 Résultats de simulation :

Figure III.9: Puissance active (Watt)

Figure III.10: Zoom puissance active t=6 s

La Figure III.10 représente l'évolution de la puissance active de notre système, qui suite à l'application d'une variation de puissance de - 2 MW à t=6 s. présente un temps de réponse de 0.02s avec un temps d'établissement de 0.2s

Figure III.11: Zoom puissance active $t=4$ s

La Figure III.11A $t=4$ s le régime de fonctionnement de notre génératrice passe d'un mode hyper-synchrone vers le mode hypo-synchrone, suite à quoi l'évolution de notre puissance active est plus stable avec des pic de $\pm 4 \cdot 10^5$ présentant moins de variation.

Figure III.12: Puissance réactive

Figure III.13: Zoom puissance réactive

La Figure III.13 représente l'évolution de la puissance réactive de notre système, suite à l'application d'une variation de puissance active de -2 MW à $t=4$ s, notre signale présente un temps de réponse de 0.024 s avec un temps d'établissement de 0.2 s

Figure III.14: Couple électromagnétique

La **Figure III.14** représente le couple électromagnétique dans notre système

Figure III.15: Zoom couple électromagnétique a t=6 s

Suite à la variation de la puissance active à t=6 s, on a une variation de C_{em} entre $(-0.6 \cdot 10^4 \text{ à } -2 \cdot 10^4)$ Nm.

Figure III.16: Zoom couple électromagnétique a t=4 s

Figure III.16 A t=4 s. Le régime de fonctionnement de notre génératrice passe d'un mode hyper-synchrone vers le mode hypo-synchrone, suite à quoi l'évolution de notre couple électromagnétique est plus stable présentant moins de variation.

Figure III.17: La vitesse

Figure III.18: Courants statoriques

La Figure III.18: Représente Les courants rotorique sont sinusoïdaux.

On a une variation représente l'évolution des courants de notre système, qui suite à l'application d'une variation de puissance réactive de -2 MW à $t=4$ s, notre signale de courant présente une augmentation d'amplitude de 2000A. et a $t=6$ s. à l'application une variation de puissance activé de -2 MW, notre signale de courant présente une augmentation d'amplitude de 2750 A.

Figure III.19: Courants rotorique

La Figure III.19: Représente Les courants rotorique sont sinusoïdaux.

On a une variation représente l'évolution des courants de notre système, qui suite à l'application d'une variation de puissance réactive de -2 MW à $t=4$ s, notre signale de

courant présente une augmentation d'amplitude de 5120 A. et a $t=6s$. à l'application une variation de puissance réactif de -2 MW, notre signal de courant présente une augmentation d'amplitude de 6000 A.

Conclusion :

On s'est proposé d'effectuer deux simulations en plus de l'emploi du régulateur PI classique, dans l'espoir d'améliorer nos simulations (performances des régulateurs) que ce soit avec un régulateur PI neuronal ou avec la commande H_{∞} .

Les résultats ainsi obtenus avec les trois procédés (PI classique, PI neuronal et la commande H infini) nous ont permis d'observer que les résultats étaient plus au moins identiques à l'exception du régulateurs PI classique qui a été le plus performant.

Conclusion Générale :

Après avoir établie une étude détaillé (modélisation, simulation) d'une turbine à vitesse variable qui nous a permis de valider notre model. le choix du profil de vent s'est basé sur le modèle de Van Der Hoven. La commande MPPT avec asservissement de vitesse nous a permis de mettre en évidence les performances de notre régulateur PI tout en présentant l'évolution des différents paramètres C_p , λ et β . En second lieu notre intérêt s'est porté sur la modélisation de la MADA avec l'étude sur un aérogénérateur d'une puissance de 2MW à vitesse variable. Il s'en est suivi une étude comparative sur les performances des régulateurs avec une commande directe de la génératrice.

La troisième et dernière partie consistait à effectuer une étude comparative trois procédés (PI classique, PI neuronal et la commande H infini) qui nous ont permis d'observer que les résultats étaient plus au moins identiques à l'exception du régulateurs PI classique qui a été le plus performant.

Perspectives :

Comme perspective, il serait très intéressant de :

1. D'étudier la qualité des signaux courants et tension injecter par l'aérogénérateur dans le réseau ;
2. revoir la configuration des convertisseurs pour pouvoir monter de puissance (convertisseurs multi-niveaux)
3. revoir l'utilité d'intégrer des régulateurs intelligent en optimisant le calcul de leur coefficients

[01] Laboratoires de Systèmes Energétiques, www.fifel.ch/includes/asp, (2001).

[02] CREG. Programme de Développement des Energies Renouvelables 2015–2030. <http://www.creg.gov.dz/images/stories/PDF/creg-15mars.pdf>

[03] Seltzer P., Lasserre A., Le climat de l'Algérie, institut de météorologie de physique du globe de l'Algérie, 04272, 1930

[04] Energie éolienne documentation service de la colonisation et de l'hydraulique 121951

[05] Zaoui rapport mesure de l'énergie éolienne service de la colonisation et de l'hydraulique mai 1954

[06] Daaou Nedjari Hafida, Maitre De Recherche B-Division Energie Eolienne – CDER

[07] Modelisation Du Systeme Electrique A Eoliencouplee Au Reseau Electrique De Distribution

- [08] Kamel AMMOUR et Ahmed MEKELLECHE « Commande de la vitesse d'une éolienne par l'approche multi-modèle » mémoire de Master en Electrotechnique Université Abou bekr Belkaid Tlemcen le 22/10/2014
- [09] KEBBAS Noureddine « Etude et simulation d'une turbine d'un aérogénérateur avec différents régulateurs » mémoire de Master en Electrotechnique Université Abou bekr Belkaid Tlemcen 28 / 06 / 2018
- [10] Armand BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, le 11 décembre 2006
- [11] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », école polytechnique de l'université de nantes, 2003.
- [12] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [13] Hicham BOUREGBA et Ouassini BENDRA « Etude et simulation d'un aérogénérateur (Turbine + MADA) avec différents régulateurs » Master, Université de Tlemcen, 2018.
- [14] A. DAVIGNY, « Participation aux services système de fermes éoliennes à vitesse variable intégrant un stockage inertiel d'énergie, « Thèse de Doctorat, USTL Lille (France), 2007.
- [15] MAHDJOUBI Mohammed.A.kaiyoum et SOUANE Bouziyan « Commande MULTIMODÈLES simplifiées d'une turbine éolienne » Master, Université de Tlemcen, 2013.
- [16] B. Boukhezzar « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable » Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en science, université Paris d'Orsay, 2006.
- [17] M.LOUCIF « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur ». Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Génie Electrique, université Tlemcen, 2016.
- [18] CHEKKAL Samira « Evaluation des Performances de l'Aérogénérateur à base de la Machine Asynchrone Double Etoile Connecté au Réseau Electrique » en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique Option : Systèmes ElectroEnergétiques Université A.MIRA-BEJAIA le 06 / 10 / 2011
- [19] MAHDJOUBI Mohammed.A.kaiyoum et SOUANE Bouziyan « Commande MULTIMODÈLES simplifiées d'une turbine éolienne » Pour l'obtention du diplôme de MASTER en Automatique Université TLEMEN le 14/10/2013

- [20] MAKHLOUF Zineb<<Contrôle de Puissances d'une Génératrice dans une Chaîne de Production d'Énergie Éolienne>>Master, Université de Annaba 2018.
- [21] Anes SAHRAOUI Abdelhafid REKIOUK, « Commande des puissances actives et réactives d'une éolienne basée sur une MADA Master, Université Tlemcen 2017.
- [22] A. Boyette. Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Ecole Doctorale : Informatique, Automatique, Electronique Electrotechnique, Mathématique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [23] BOUANANI Youcef et BOUANANI Youcef<<Contribution à la commande d'une génératrice asynchrone à double alimentation>>Master, Université de Bejaia 2015
- [24] Abdessemed et M. Kadjoudj, "Modélisation des machines électriques", Presses de l'Université de Batna, 1996.
- [25] G. Bornard, J. Courault, B.D. Fornel, R. Perret, ... ect, "Modélisation, contrôle vectoriel et DTC", Hermes Science Publications, volume 1, Paris, 2000.
- [26] A. Petersson, "Analyse, Modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines ", thèse de licence en électrotechnique, université technologique de Chalamer, Göteborg, Sweden 2003.
- [27] Abdelhakim Dendouga « Commande de la génératrice asynchrone double alimentation » maître de conférence à l'université de Biskra.
- [28] L. Baghli, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques", Thèse en vue de l'obtention du titre de Docteur de l'Université Henry Poincaré, Nancy-I, France, 1999.
- [29] S. A. Ardjoun, «commande en vitesse par mode glissant d'une machine Asynchrone a Double Alimentation », mémoire de magister, université sidi bel-Abbes, 2010.
- [30] BENAOUICHA Mounir et GUERROUT Youcef «Réalisation d'un onduleur de tension commandé par la carte Dspace 1104» Mémoire de master, université bejaia 2015.
- [31] A.Meroufel, «contrôle de la machine asynchrone ».polycopie de cours, université djilailiabes, sidi bel-Abbes, Algérie, 2009.
- [32] Azzouz TAMAARAT« intitulé modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne a base d'un MADA» thèse doctorat, université Biskra 2015.
- [33] GUEZZEN Amina, AOUANE Abderrezak « Etude et Simulation de Deux Eoliennes Petite et Moyenne Puissance », mémoire, 2015.

- [34] SELMOUN Tariq ,ARRAHMANE Mohammed. « Etude et simulation d'une commande robuste d'une éolienne à base d'une MADA » Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen
- [35] BRAHIMI OUSSAMA et MECHERNENE MOHAMMED WALID « Commandes d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans une chaîne éolienne » » Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen le 06 /07/2017
- [36] Alexis Mahe, Jean-Christophe Olivier, Azeddine Houari, Mohamed Machmoum, Jérôme Deniaud. Dimensionnement des éléments passifs d'un convertisseur cascadié en vue de l'intégration d'organes de stockage au réseau. Symposium de Génie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France.
- [37] DJERIRI Youcef « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle » UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES le 05 /11/2015.
- [38] M. MEDJILI Fayçal <<Modélisation par Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et commande Prédictive non linéaire d'une station de production d'eau froide>> Master, Université Annaba 2010.
- [39] MERZOUKA NOURESSADAT<< Etude des performances des réseaux de neurones dynamiques à représenter des systèmes réels : une approche dans l'espace d'état>> AGISTER, Université Setif 2010.
- [40] Gilles_duc_stephen_Font, « commande H_{∞} et analyse », Hermès l'année d'éducation, 1999
- [41] R. Asgharian “Asymptomatic approach to performance weights selection in design of robust PSS using genetic algorithms”

Paramètre de simulation – Turbine

```

Vv=10;
ro_v=1.22;
m1=0.4;
m2=0.25;
dw=0.002;
Ts=1;
Lf=195;
k_ro=0.14;
R=40;
G=90; Omega
=157;
pi=3.14;
Xi=0.7;
beta=2;
Jt=4.9e6;
Jg=0.9e6;
J=(Jt/G^2)+Jg
wn=1.43;
k=0:1:(3.14/(Ts*dw));
ss=ones(1,(3.14/(Ts*dw)+1));
ro_v=k_ro*Vv;
Tf=Lf/Vv;
Sf1=((m1*Tf.*k*dw).^2+ss)./(((Tf.*k*dw).^2+ss).*(m2*Tf.*k*dw).^2+ss);
sft=sum(Sf1);
Kf=sqrtm(3.14/(Ts*dw*sft));
num=[m1*Tf 1];
din=conv([Tf 1],[m2*Tf 1]);
Hf=Kf*tf(num,din);
omega_t=omega/G
Lambda=((omega_t)*R)/Vv
Cp=0.18*((90/(0.4+0.5*lambda))-(6.8-0.115*beta^2))*exp(-8/(0.4+0.5*lambda)+0.16)

```

Paramètre de simulation – MADA

f=50;
Ps=2e6;
n=1500;
Vs=690;
Is=1760;
Tem=12732
; p=2;
u=1/3;
Vr=2070;
smax=1/3;
*Vr_stator=(Vr*smax)*u;*
Rs=2.6e-3;
Lsi=0.087e-3;
Lm=2.5e-3;
Rr=2.9e-3;
Ls=Lm+Lsi;
wm=250;
Lr=Lm+Lsi;
*Vbus=Vr_stator*sqrt(2);*
*sigma=1-Lm^2/(Ls*Lr);*
*Fs=Vs*sqrt(2/3)/(2*pi*f);*
J=127;
D=1e-3;
R=42; G=100;
ro=1.225; fsw=4e3;
Ts=1/fsw/50;
*tau_i=(sigma*Lr)/Rr*
; tau_n=0.05;
wni=100(1/tau_i);*
wnn=1/tau_n;

ملخص

أحدث نماذج الطاقة تشير إلى حدودها وبالتالي الحاجة إلى إيجاد حلول التي تساعد على حماية البيئية بشكل أفضل. اختيار مصادر الطاقات المتجددة هو حل عملي.

نقترح إجراء دراسة على توربينات الرياح مجهزة بمولد التغذيةية المزدوجة والتوربين مع الأخذ في عين الاعتبار التغير المفاجئ لسرعة الرياح بحيث يمكن توليد 2 ميغاواط نحو الشبكة. بعد دراسة مفصله (النمذجة، والمحاكاة) من توربينات السرعة المتغيرة التي سمحت لنا بالتحقق من صحة نموذجنا. تم اختيار نموذج فان دير هوفن لمسار الرياح. التحكم MPPT سمح لنا بإيجاد نتائج الأقرب إلى الحقيقة. وأعقب ذلك دراسة مقارنه لأداء المنظمين مع السيطرة المباشرة على المولد. وأخيرا أجرينا دراسة مقارنه لثلاث عمليات (PI الكلاسيكية، PI العصبية والتحكم H لانهاية) التي سمحت لنا ملاحظة ان النتائج كانت متقاربة باستثناء PI الكلاسيك الذي كان له أفضل أداء. كلمات مفتاحية: توربينات - مولد التغذيةية المزدوجة - PI الكلاسيكية، PI العصبية- والتحكم H لانهاية

Abstract

The energy model used to date has shown its limitations, hence the need to find palliative solutions which allow better protection of the environment and no longer exploit primary energies which is becoming more and more exhausted.

The choice to use renewable energy is a viable option. It is proposed to conduct a study on a wind turbine with a DFIG and a turbine taking into account the untimely evolution of the wind so that 2 MW can be delivered to the grid.

After having established a detailed study (modelling, simulation) of a variable speed turbine, which allowed us to validate our model. The choice of wind profile was based on Van Der Hoven model. MPPT control with speed control has allowed us to highlight the performance of our PI regulator while presenting the evolution of the different parameters C_p , λ and β .

The third and last part consisted in a comparative study of three processes (conventional PI, neural PI and infinite H control) which allowed us to observe that the results were identical except for the classical PI regulators, which were the most efficient.

Key words: DFIG - conventional PI - neural PI - infinite H control.

Résumé

Le model énergétique utilisé à ce jours a montré ses limites, d'où la nécessité de trouver des solutions palliatives qui permettent une meilleure protection de l'environnement et ne plus exploiter les énergies primaires qui s'épuisent de plus en plus. Le choix d'exploiter les énergies renouvelables est une solution viable.

On se propose de faire une étude sur un aérogénérateur munie d'une génératrice à double alimentation et une turbine prenant en compte l'évolution intempestive du vent de sorte qu'on puisse délivrer au réseau 2 MW.

Après avoir établie une étude détaillé (modélisation, simulation) d'une turbine à vitesse variable qui nous a permis de valider notre model. Le choix du profil de vent s'est basé sur le modèle de Van Der Hoven. La commande MPPT avec asservissement de vitesse nous a permis de mettre en évidence les performances de notre régulateur PI tout en présentant l'évolution des différents paramètres C_p , λ et β . Il s'en est suivi une étude comparative sur les performances des régulateurs avec une commande directe de la génératrice.

La troisième et dernière partie consistait à effectuer une étude comparative trois procédés (PI classique, PI neuronal et la commande H infini) qui nous ont permis d'observer que les résultats étaient plus au moins identiques à l'exception du régulateurs PI classique qui a été le plus performant.

Mots clé : MADA – aérogénérateur - PI classique, PI neuronal et la commande H infini