

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure

Et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA Bejaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en

Électrotechnique option Commande électrique

Thème

**Étude d'une éolienne en fonctionnement autonome
à base d'une GADA**

Présenté par :

Mr : MESSAOUDI Fares

Mr : OUALI Abdellatif

Encadré par :

Mr : D. AOUZELLAG

Co-Encadré par :

Mr : K. ABDOUNE

Devant le jury :

Mr : B. FELLA

Mlle : N. ROUHA

**Année universitaire
2019/2020**

Remerciements

Nous tenons à remercier éternellement notre dieu le tout puissant de nous avoir accordé tant de courage et de connaissance tout au long de notre parcours étudiantin et de la vie de tous les jours.

Que messieurs AOUZELLAG Djamel et ABDOUNE Kaddour trouvent ici l'expression de nos plus vifs remerciements pour nous avoir aidé et suivi patiemment dans l'élaboration de ce mémoire.

Qu'il nous soit permis également de remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont la source de mon
inspiration et mon courage.*

*A ma très chère mère, qui m'a toujours donné l'espoir de
vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.*

*A mon très cher père, pour ses encouragements, son
soutien,*

*et surtout son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes
études.*

A mon cher frère

A ma chère sœur

A mes grands-parents

et A tous mes amis.

M. Fares

Dédicaces

A qui je dédie cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sont eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

A mes chers frères ;

A mes sœurs et leurs familles ;

A tous mes amis ;

A mon binôme Fares ;

A tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce mémoire ;

A toute la famille Abdelkaoui ;

OUALY ABDELLA777

Sommaire

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

Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne et les réseaux électriques autonomes

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique.....	4
I.3 Définition de l'énergie éolienne.....	4
I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	5
I.5 Différents types d'éoliennes.....	6
I.5.1 Eolienne à axe vertical.....	6
I.5.2 Eolienne à axe horizontal.....	7
I.6 Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	8
I.7 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	9
I.8 Systèmes éoliens couplés au réseau électrique.....	10
I.8.1 Éolienne à vitesse fixe.....	10
I.8.2 Éolienne à vitesse variable.....	11
I.8.2.1 Machine asynchrone.....	11
I.8.2.2 Machine synchrone.....	13
I.9 Système éolien en fonctionnement isolé et autonome.....	14
I.9.1 Machine synchrone.....	14
I.9.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné.....	14
I.9.1.2 Machine synchrone à aimants permanents.....	14
I.9.2 Machine asynchrone.....	15
I.9.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	15
I.9.2.2 Machine asynchrone à double alimentation.....	17
I.10 Systèmes de stockage de l'énergie électrique.....	22
I.11 Choix de la structure en fonctionnement autonome qui sera étudié dans les prochains chapitres	22
I.12 Conclusion.....	23

Chapitre II : Modélisation des différentes parties d'un système autonome éolien à base d'une GADA

II.1 Introduction.....	24
II.2 Description générale du système éolien étudié.....	25

II.3 Modélisation du système éolien étudié.....	25
II.3.1 Modélisation du vent.....	25
II.3.2 Modélisation d'une turbine éolienne.....	25
II.3.2.1 Modèle aérodynamique.....	26
II.3.2.2 Modèle de Multiplicateur.....	27
II.3.2.3 Modèle de l'arbre mécanique.....	28
II.3.3 Modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné.....	29
II.3.3.1 Modélisation de cette machine dans le repère naturel (abc).....	29
II.3.3.2 Modélisation de cette machine dans le repère de Park (dq).....	31
II.3.4 Modélisation des convertisseurs statiques.....	34
II.3.4.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle.....	36
II.3.5 Modélisation du bus continu.....	37
II.3.6 Modélisation de la charge.....	37
II.4 Résultats de simulation.....	38
II.4.1 Résultats de simulation de la turbine.....	38
II.4.2 Résultats de simulation de la GADA.....	39
II.5 Conclusion.....	42

Chapitre III : Commande vectorielle de la GADA et control de la tension générée

III.1 Introduction.....	43
III.2 Commande vectorielle.....	44
III.2.1 Méthodes de la commande vectorielle.....	44
III.2.1.1 Commande vectorielle directe (CVD).....	45
III.2.1.2 Commande vectorielle indirecte (CVI).....	45
III.2.2 Orientation du flux.....	45
III.2.2.1 Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique.....	46
III.2.2.2 Définition de l'algorithme de commande.....	48
III.2.2.3 Contrôle des courants et termes de compensation.....	49
III.3 Contrôle de la tension de sortie en termes d'amplitude et de fréquence.....	51
III.4 Amorçage de la MADA sans source extérieure.....	52
III.5 Conclusion.....	54

Chapitre IV : Résultats de simulation et interprétations du système autonome étudié

IV.1 Introduction.....	55
IV.2 Simulation du système global à base d'une MADA totalement interfacée.....	56
IV.2.1 Auto amorçage.....	56
IV.2.2 Impact de la variation de la charge.....	59
IV.2.3 Impact de la variation de la vitesse.....	62
IV.4 Conclusion.....	65
Conclusion générale.....	66
Références bibliographiques.....	68
Annexes.....	70

Liste des figures

Figure I.1 : Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne.....	6
Figure I.2 : Différents types d'éoliennes à axe vertical.....	7
Figure I.3 : Eolienne en amont et en aval.....	7
Figure I.4 : Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	9
Figure I.5 : Caractéristiques de puissance pour les deux types de régulation.....	10
Figure I.6 : Système éolien basé sur une GAS à cage à vitesse fixe.....	10
Figure I.7 : Système éolien basé sur GAS à cage connecté au réseau électrique via un convertisseur statique CA/CC/CA.....	12
Figure I.8 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA partiellement interfacée avec le réseau	12
Figure I.9 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA totalement interfacée avec le réseau...	13
Figure I.10 : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents raccordée au réseau.....	14
Figure I.11 : Eolienne basée sur une machine synchrone connectée à un redresseur MLI.....	15
Figure I.12 : Eolienne basée sur une MAS auto-excitée avec une batterie de condensateur.....	16
Figure I.13 : Structure avec ponts de diodes et onduleur MLI.....	16
Figure I.14 : Structure à base de deux convertisseurs MLI.....	17
Figure I.15 : MADA en fonctionnement autonome partiellement interfacée.....	18
Figure I.16 : MADA en fonctionnement autonome totalement interfacée.....	18
Figure I.17 : Modes de fonctionnement de la GADA.....	19
Figure I.18 : Schéma d'amorçage par élément du stockage au bus CC.....	20
Figure I.19 : Schéma d'amorçage par un banc de capacités au stator.....	20
Figure I.20 : Schéma d'amorçage par une GSAP placée sur le même arbre.....	21
Figure II.1 : Système éolien étudié à base d'une MADA totalement interfacé.....	25
Figure II.2 : Turbine éolienne connectée à une génératrice via un multiplicateur de vitesse.....	26
Figure II.3 : Caractéristiques $C_p(\lambda, \beta)$ de l'éolienne étudiée.....	27
Figure II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	28
Figure II.5 : Représentation schématique de la machine asynchrone à rotor bobiné.....	29
Figure II.6 : Repères de référence : statorique $s\alpha - s\beta$; rotorique $r\alpha - r\beta$; tournant dq	32
Figure II.7 : Convertisseurs statiques.....	35
Figure II.8 : Principe de la commande MLI sinus-triangle.....	37
Figure II.9 : Représentation du circuit du bus continu.....	37

Figure II.10 : Variation de l'allure du vent	38
Figure II.11 : Variation de la vitesse de l'arbre rapide.....	38
Figure II.12 : Variation de la puissance aérodynamique.....	38
Figure II.13 : Variation du couple aérodynamique de la turbine	38
Figure II.14 : Schéma de simulation de la GADA sans convertisseur statique.....	39
Figure II.15 : Schéma de simulation de la GADA avec convertisseur statique.....	39
Figure II.16 : Tensions des phases statoriques.....	40
Figure II.17 : Tensions des phases statoriques avec zoom sur l'image.....	40
Figure II.18 : Variation des puissances active et réactive statoriques.....	40
Figure II.19 : Variation des puissances active et réactive rotoriques.....	40
Figure II.20 : Variation du couple électromagnétique.....	40
Figure II.21 : Tensions des phases rotoriques.....	40
Figure II.22 : Tensions des phases statoriques.....	41
Figure II.23 : Tensions des phases statoriques avec zoom sur l'image.....	41
Figure II.24 : Variation des puissances active et réactive statoriques.....	41
Figure II.25 : Variation des puissances active et réactive rotoriques.....	41
Figure II.26 : Variation du couple électromagnétique	42
Figure II.27 : Tension d'une phase rotorique.....	42
Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle.....	44
Figure III.2 : Référentiel diphasé (dq) lié au champ tournant statorique.....	46
Figure III.3 : Orientation du flux statorique.....	48
Figure III.4 : Boucles de régulation des courants du stator et du rotor.....	50
Figure III.5 : Schéma de commande d'une MADA totalement interfacée.....	51
Figure III.6 : Commande MLI du convertisseur coté charge.....	52
Figure III.7 : Diagramme d'énergie correspondant au processus d'amorçage.....	53
Figure IV.1 : Schéma global à base d'une GADA en fonctionnement autonome à contrôler.....	56
Figure IV.2 : Allures de la tension du bus continu et sa référence.....	57
Figure IV.3 : Zoom sur la tension du bus continu et sa référence	57
Figure IV.4 : Composantes directe et quadratique du flux statorique.....	57
Figure IV.5 : Composantes directe et quadratique du flux rotorique.....	57
Figure IV.6 : Composantes directe et quadratique des courants statoriques.....	58
Figure IV.7 : Composantes directe et quadratique des courants rotoriques.....	58

Figure IV.8 : Puissances active et réactive statoriques.....	58
Figure IV.9 : Puissances active et réactive rotoriques.....	58
Figure IV.10 : Allure de la tension du bus continu.....	59
Figure IV.11 : Composantes directe et quadratique du flux statorique.....	59
Figure IV.12 : Composantes directe et quadratique du flux rotorique.....	59
Figure IV.13 : Allures des puissances statoriques.....	60
Figure IV.14 : Allures des puissances rotoriques.....	60
Figure IV.15 : Allures de la somme des puissances actives statorique et rotorique.....	60
Figure IV.16 : Allure de la puissance de la charge.....	60
Figure IV.17 : Allure des courants de la charge.....	60
Figure IV.18 : Zoom sur les courants de la charge	60
Figure IV.19 : Allures des tensions de la charge	61
Figure IV.20 : Zoom sur les tensions de la charge	61
Figure IV.21 : Courant et tension d'une phase	61
Figure IV.22 : Allure du couple électromagnétique	61
Figure IV.23 : Allure de la vitesse de rotation de la génératrice	62
Figure IV.24 : Tensions du bus continu et sa référence	62
Figure IV.25 : Composantes directe et quadratique du flux statorique.....	62
Figure IV.26 : Composantes directe et quadratique du flux rotorique	62
Figure IV.27 : Allures des courants de la charge	63
Figure IV.28 : Allures des tensions de la charge.....	63
Figure IV.29 : Tension et courant d'une phase	63
Figure IV.30 : Allure de la puissance de la charge.....	63
Figure IV.31 : Allures des courants statoriques.....	63
Figure IV.32 : Zoom sur les courants statoriques.....	63
Figure IV.33 : Allures des courants rotoriques.....	64
Figure IV.34 : Zoom sur les courants rotoriques.....	64
Figure IV.35 : Allure du couple électromagnétique.....	64
Figure B.1 : Schéma bloc d'un processus régulé par un PI.....	71

Glossaires

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

L_m	Inductance mutuelle cyclique [H]
d, q	Système d'axes du repère tournant
θ	Position de l'axe statorique par rapport à l'axe rotorique [rd]
θ_s	Position angulaire du stator [rd]
θ_r	Position angulaire du rotor [rd]
ω	Vitesse électrique de la MADA [rd/s]
ω_s	Pulsation des tensions statoriques [rd/s]
ω_r	Pulsation des tensions rotoriques [rd/s]
p	Nombre de paires de pôles de la génératrice
v_{sd}, v_{sq}	Composantes de la tension statorique dans le repère (d, q) [V]
v_{rd}, v_{rq}	Composantes de la tension rotorique dans le repère (d, q) [V]
i_{sd}, i_{sq}	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q) [A]
i_{rd}, i_{rq}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q) [A]
ϕ_{sd}, ϕ_{sq}	Composantes du flux statorique dans le repère (d, q) [Wb]
ϕ_{rd}, ϕ_{rq}	Composantes du flux rotorique dans le repère (d, q) [Wb]
P_s, Q_s	Puissances active et réactive statoriques [W] [VAR]
P_r, Q_r	Puissances active et réactive rotoriques [W] [VAR]
S_{rjj}, S_{sj}, S_{gi}	Fonctions de connexion logique des convertisseurs
$v_{on-a}, v_{on-b}, v_{on-c}$	Tensions de sortie de l'onduleur [V]
v_{dc}	Tension du bus continu [V]
C_{dc}	Capacité du condensateur du bus continu [F]
I_m, T_m	Indice de modulation et taux de modulation, respectivement
$f_p, f_{réf}$	Fréquence de la porteuse et fréquence de référence, respectivement [Hz]
$v_p, v_{réf}$	Tension de la porteuse et tension de référence, respectivement [V]
i_{sc}	Courant issu du convertisseur coté stator [A]
i_{rc}	Courant issu du convertisseur coté rotor [A]
i_m	Somme des deux courants issus des convertisseurs coté machine [A]
i_{ic}	Courant continu modulé par le convertisseur coté charge [A]
i_c	Courant capacitif traversant le condensateur du bus continu [A]
g	Glissement de la génératrice
P	Puissance de la charge [W]
P_{em}	Puissance électromagnétique [W]
$F^s(s)$	Fonction de transfert liant tensions-courants statoriques
$F^r(s)$	Fonction de transfert liant tensions-courants rotoriques

σ	Coefficient de dispersion entre le stator et le rotor
v_{ch}	Tensions de la charge [V]
ω_{ch}	Pulsation des tensions de la charge [rd/s]

Indices

X^*	Indique la valeur de référence
X_n	Indique la valeur nominale
X_m	Indique la valeur maximale
X_{opt}	Indique la valeur optimale

Abréviations

MADA	Machine asynchrone à double alimentation
GADA	Génératrice asynchrone à double alimentation
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
GSAP	Génératrice synchrone à aimants permanents
MAS	Machine asynchrone
GAS	Génératrice asynchrone
CC	Courant continu
CA	Courant alternatif
PCC	Point commun de raccordement
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
CCS	Convertisseur côté stator
CCR	Convertisseur côté rotor
CVD	Commande vectorielle direct
CVI	Commande vectorielle indirect

Introduction générale

Le contexte politique, économique et énergétique actuel très favorable au développement des énergies renouvelables conduit à une croissance rapide de la filière éolienne à l'échelle mondiale. Grâce à la diminution du coût d'installation et à l'application des technologies avancées basées sur l'électronique de puissance, la filière éolienne se développe très rapidement et sa part dans le mix énergétique devient de plus en plus importante. L'énergie éolienne fait aujourd'hui partie du paysage des producteurs d'électricité et représente déjà dans certains pays une part significative de la capacité totale de production d'électricité.

L'aspect le plus visible de cette évolution est sans conteste celui des installations d'éoliennes de grande taille, reliées aux réseaux électriques. Les coûts pour ces grandes éoliennes ont diminué jusqu'au point où ils commencent à être comparables aux technologies traditionnelles de production d'électricité [Abd 18]. Un autre aspect, moins visible mais qui a tout autant d'importance, est celui des petites unités de production. En effet, ces dernières sont de plus en plus prisées pour des fonctionnements autonomes pour assurer l'alimentation de sites isolés et/ ou autonome.

Dans le cas de l'utilisation en centrales autonomes, un intérêt de plus en plus croissant est accordé aux systèmes de conversion à base de machines asynchrones à rotor bobiné. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre cette catégorie de machine, du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor.

Cependant, quelle que soit la machine utilisée, le fonctionnement en générateur autonome se distingue par des contraintes et des spécificités autres que celles rencontrées dans le cas des grandes centrales éoliennes. En effet la préoccupation principale de ce fonctionnement est le maintien de l'amplitude et la fréquence de la tension générée à des valeurs constantes quelles que soit la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance demandée dans une certaine plage. Ceci passe alors par la mise en œuvre d'une commande du système éolien. A ce point s'ajoute le facteur économique, en effet le coût doit être modéré dans le cas de centrales éoliennes autonomes.

Notre travail consiste à étudier et à évaluer les performances d'un système éolien autonome à base d'une machine asynchrone double alimentée totalement interfacée, permettant de produire une puissance nécessaire pour l'alimentation d'un site isolé. Pour ce faire, ce mémoire sera organisé comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à un état de l'art sur l'énergie éolienne et à la description des différentes architectures adoptées dans les systèmes éoliens connectés au réseau électrique et dans les systèmes éoliens isolés et autonomes.

Le deuxième chapitre abordera la modélisation de la chaîne de conversion éolienne étudiée (Turbine, MADA et Convertisseurs).

Le troisième chapitre sera dédié à la présentation de la technique de commande vectorielle de la MADA.

Le quatrième chapitre donnera les résultats de simulation du système global autonome.

Enfin, notre travail sera clôturé par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie éolienne et les réseaux électriques autonomes

I.1 Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne et sur les différentes chaînes utilisées dans la conversion de l'énergie éolienne soit dans les systèmes connectés au réseau électrique (moyenne et grande puissances) ou dans les systèmes isolés et autonomes (petite puissance).

Dans un premier temps, nous présenterons un état de l'art sur l'énergie éolienne. Ensuite, nous nous consacrons à la description de diverses architectures employées dans les systèmes éoliens connectés au réseau électrique et dans les systèmes éoliens autonomes selon le type du générateur utilisé. Une attention particulière est évidemment accordée à ces dernières. Nous concluons cette partie en donnant les différents systèmes de stockage d'énergie.

Enfin, nous choisirons la structure qui fera l'objet de notre étude en fonctionnement isolé et autonome.

I.2 Historique

Capter le vent est l'une des plus anciennes méthodes de production d'énergie. Depuis les temps anciens, l'Homme a utilisé l'énergie éolienne pour moudre du grain ou pour pomper de l'eau. Avec la découverte de l'électricité à la fin du 19^e siècle, les premiers prototypes d'éolienne ont été construits, avec une technologie calquée sur les moulins à vent. Depuis, l'éolien est devenue une source d'énergie à part entière [Amm 20].

Ainsi, la première grande éolienne exploitée pour la production de l'énergie électrique, dotée d'une puissance de 12 kW, a été installée à Cleveland, Ohio, en 1888. A la fin de la première guerre mondiale, le Danemark a généralisé l'utilisation des éoliennes de 25 kW. Les USA s'inspirent de la conception des hélices d'avions et des ails de monoplane pour concevoir des éoliennes. Durant la période comprise entre 1935 et 1970, les efforts fournis par le Danemark, la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni ont montré que des éoliennes de grande puissance peuvent être exploitées [Rem 17].

En 1957, Le Danois Johannes Juul met au point sa turbine de Gedser d'une puissance de 200 kW. Tripale, dotée d'un système d'orientation électromagnétique et d'une génératrice asynchrone, équipée de freins aérodynamiques d'urgence actionnés par la force centrifuge en cas de survitesse, elle est la première à produire du courant alternatif. Ce modèle a largement inspiré la conception des éoliennes actuelles [Edf 20].

Suite à la crise pétrolière de 1973, des programmes de R&D sur l'énergie éolienne et les énergies renouvelables ont été lancés en Europe et aux USA. Ainsi, entre 1973 et 1986, le marché des générateurs éoliens passe du domaine domestique et agricole aux fermes éoliennes connectées aux réseaux de distribution électrique. Entre 1981 et 1990, plus de 16 000 éoliennes, allant de 20 à 350 kW (avec une puissance totale de 1.7 GW) ont été installées en Californie aux USA [Rem 17].

L'énergie éolienne est la source d'électricité renouvelable qui a la croissance la plus rapide dans le monde avec un taux de croissance moyen de 20% par an au cours des dix dernières années. La capacité de production d'électricité d'origine éolienne a grimpé de 74 GW à 484 GW durant la période comprise entre 2006 et 2016. Plus de 4% de la consommation mondiale en électricité est produite par des éoliennes. Selon l'Agence Internationale de l'Energie (IEA), 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2030 et plus de 20% vers 2040 [Abd 18].

I.3 Définition de l'énergie éolienne

D'où vient son énergie et de quoi est-elle faite ?

L'énergie éolienne provient de l'énergie solaire. Le Soleil irradie la Terre à un taux de 174 423 000 000 000 W/h de façon inégale : l'atmosphère se réchauffe plus rapidement dans les régions équatoriales et les terres se réchauffent plus rapidement que les océans. Ce différentiel de température est à l'origine de mouvements de

convection dans l'atmosphère : l'air chaud, moins dense que l'air froid, s'élève jusqu'à environ 10km d'altitude avant de se déplacer vers le nord ou le sud, tandis que l'air froid se déplace à des altitudes plus faibles. Du fait de la rotation de la Terre, les masses d'air ne se déplacent pas en ligne droite vers le nord ou le sud, mais en spirales, dans des sens opposés (l'air chaud dans le sens horaire, l'air froid dans le sens antihoraire). Les terres interfèrent avec ce flux en raison d'une différence de pression. Le vent est le mouvement de l'air qui tend à équilibrer la pression entre deux endroits [Amm 20].

Le vent est donc une masse d'air en mouvement qui transforme l'énergie thermique que cette masse a retiré du rayonnement solaire en énergie cinétique. Deux paramètres essentiels caractérisent donc le vent. Le premier, déterminant quant à la quantité d'énergie qu'il est susceptible de fournir, c'est sa vitesse, et le second, c'est la direction de son déplacement [Add 13].

I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un système éolien convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait de la manière suivante [Aou 17] :

- ✓ D'abord, la turbine (rotor) extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible et la convertie en énergie mécanique ;
- ✓ Ensuite, la génératrice convertit l'énergie mécanique reçue en énergie électrique qui sera transmise au réseau électrique.

La connexion de la génératrice au réseau peut se faire soit directement, soit par l'intermédiaire total ou partiel d'une interface d'électronique de puissance. La liaison entre la turbine et le rotor de la génératrice est assurée par la transmission mécanique. Ce principe de fonctionnement est illustré sur la figure I.1 [Aou 17].

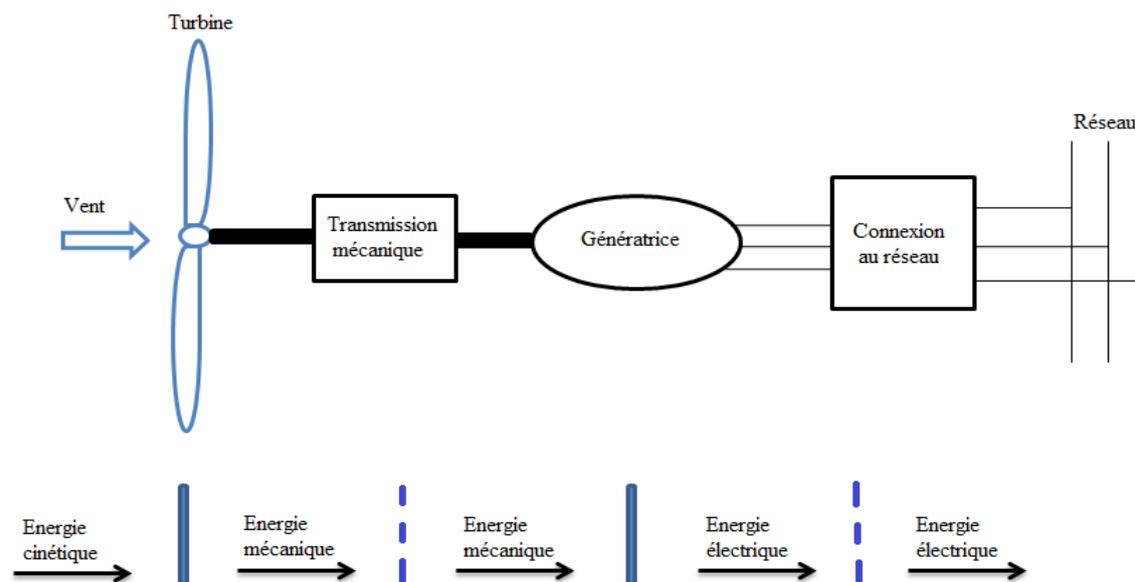


Figure I.1 : Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne [Aou 17]

I.5 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées selon deux catégories : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.5.1 Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical peuvent recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile l'utilisation d'un dispositif d'orientation. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles au dépannage en cas de dysfonctionnement. Néanmoins, elles restent marginales et peu utilisées voir abandonnées actuellement à cause de leur faible rendement aérodynamique, des turbulences qui affectent le capteur d'énergie qui est situé au près du sol, et de leur faible vitesse [Rem 17].

Il existe principalement trois technologies d'éolienne à axe vertical : les turbines Darrieus classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius, comme montré à la figure I.2. Toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales [Mir 05].

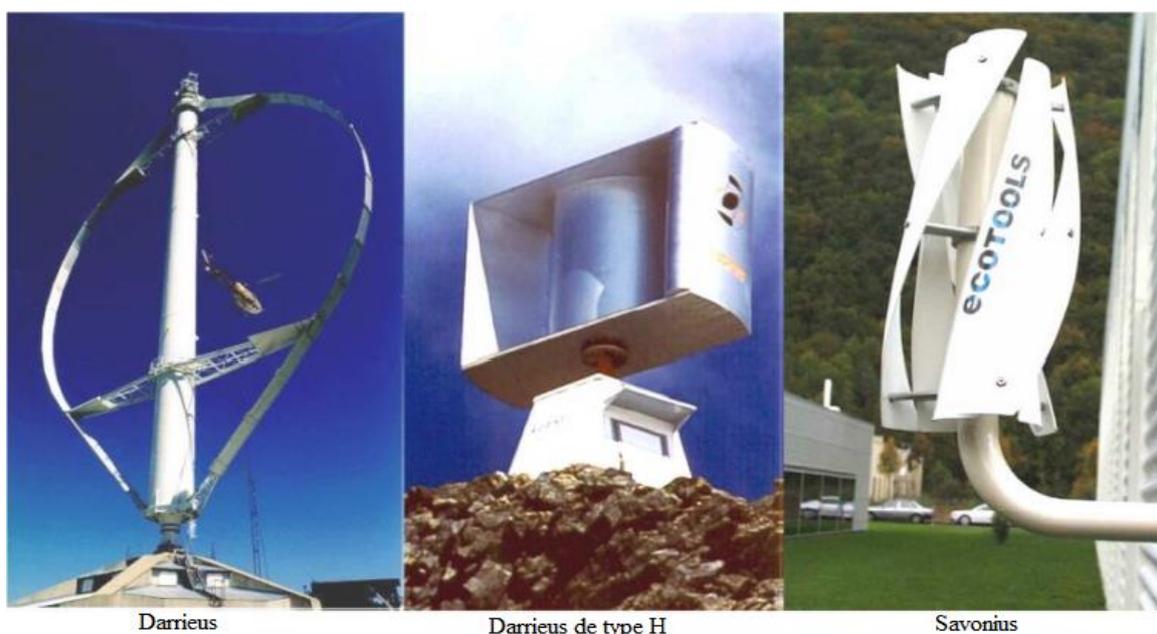


Figure I.2 : Différents types d'éoliennes à axe vertical [Mes 17]

I.5.2 Eolienne à axe horizontal

La grande partie des éoliennes installées sont à axe horizontal, car elles présentent plusieurs avantages comme la faible vitesse de démarrage et le coefficient de puissance relativement élevé. Cependant, la présence du multiplicateur de vitesse et du générateur électrique en haut de la tour pose des problèmes mécaniques et économiques ce qui rend la maintenance plus difficile à réaliser [Rem 17].

Les éoliennes à axe horizontal peuvent être monopales, bipales, tripales (les plus courantes) ou encore avoir plus de trois pales [Mir 05].

Les éoliennes à axe horizontal peuvent également être classées selon leur orientation par rapport au vent en deux groupes : celles dites en amont (up-wind) et celles en aval (down-wind). La figure I.3 montre les deux procédés.

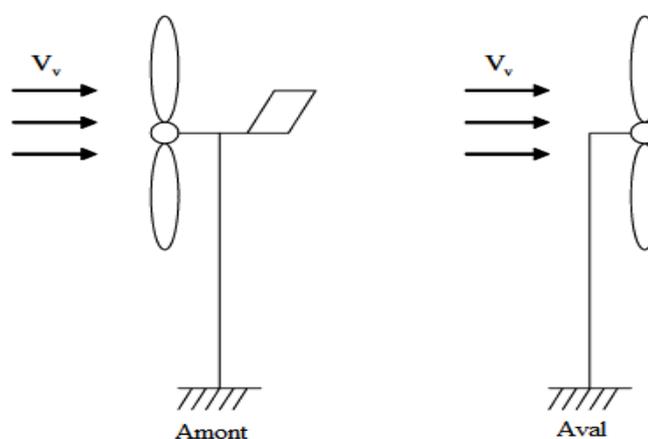


Figure I.3 : Eolienne en amont et en aval [Mir 05]

I.6 Constitution d'une éolienne à axe horizontal

Une éolienne est faite de nombreux composants qui ont chacun un rôle précis. Cependant, une éolienne est généralement constituée des éléments suivants [El-Aim 04] :

- ✓ **Mat (tour) :** Il donne l'impression d'être une pièce assez simple mais elle est en réalité très importante. Étant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de haut. La tour a la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle ;
- ✓ **Nacelle :** Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commandes. Tous ces éléments sont illustrés sur la figure I.4 ;
- ✓ **Système d'orientation :** Il oriente automatiquement la nacelle face au vent ;
- ✓ **Anémomètre et girouette :** Ils mesurent la direction et la vitesse du vent ;
- ✓ **Génératrice :** Elle est généralement une machine synchrone ou asynchrone. Elle convertit l'énergie mécanique reçue en énergie électrique ;
- ✓ **Système de refroidissement :** Il se compose généralement d'un ventilateur électrique pour refroidir la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Certaines éoliennes peuvent comporter un refroidissement à l'eau ;
- ✓ **Multiplicateur :** Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique ;
- ✓ **Système de contrôle-commande :** Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance, le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'opérateur de l'éolienne ;
- ✓ **Arbre lent :** Il relie le moyeu au multiplicateur ;
- ✓ **Arbre rapide :** C'est lui qui entraîne la génératrice ;
- ✓ **Rotor :** Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu.

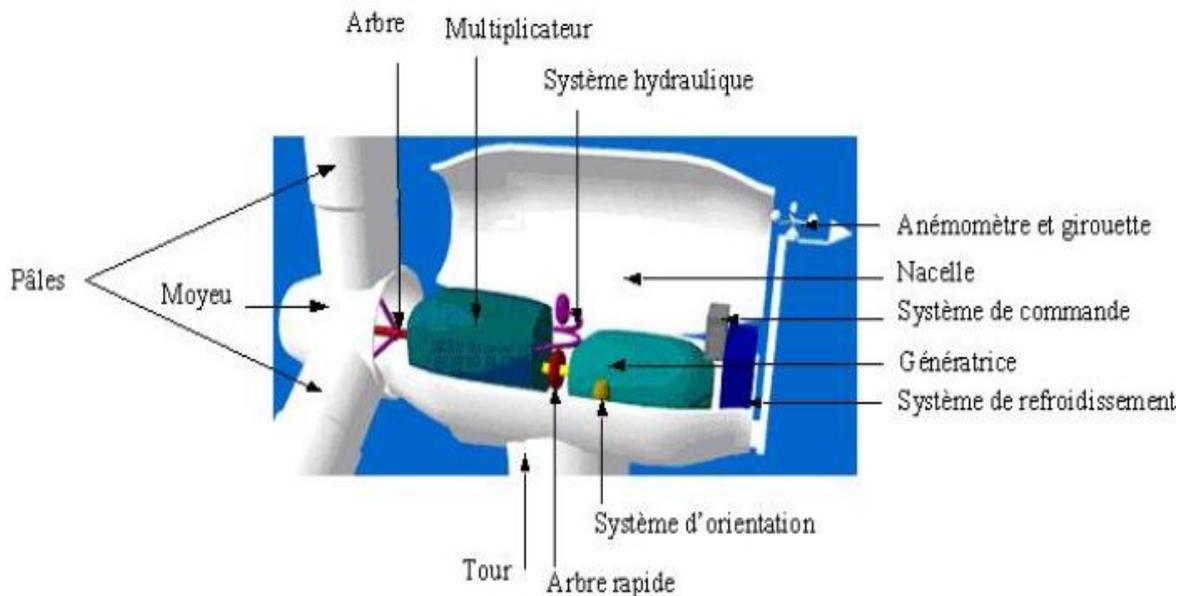


Figure I.4 : Constitution d'une éolienne à axe horizontal [El-Aim 04]

I.7 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale à une vitesse de vent nominale, au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale qui pourrait endommager la turbine.

Il existe deux techniques de contrôle de puissance aérodynamique d'une éolienne [Abd 18] :

1. « **Stall control** » ou **contrôle par 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. Les éoliennes utilisant cette méthode de contrôle possèdent en général un mécanisme de freinage en bout de pale ;
2. « **Pitch control** » ou **variation de l'angle de calage** : En cas de puissance de sortie trop élevée, un dispositif électrique ou hydraulique de mise en pas des pales avec un système de contrôle associé modifie l'angle de calage des pales autour de l'axe longitudinal pour donner une perte de portance. La mise en drapeau des pales permet aussi de freiner la turbine. Les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité. Ce système est complexe à concevoir donc plus coûteux.

La figure I.5 donne les allures de puissance en fonction de la vitesse du vent pour les deux modes de contrôle. Ainsi, pour les mêmes vitesses du vent, le mode « Stall control » donne une allure à la courbe de puissance peu stable, par contre le mode « Pitch control » permet d'avoir une puissance constante.

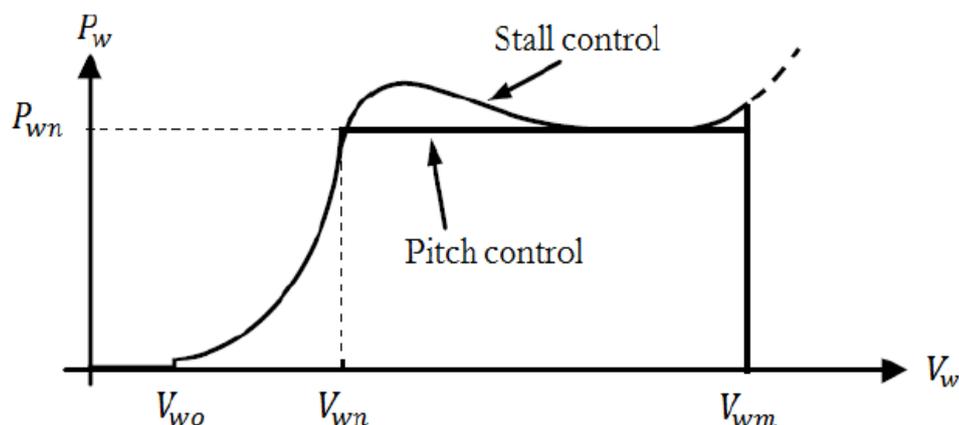


Figure I.5: Caractéristiques de puissance pour les deux types de régulation [Abd 18]

I.8 Systèmes éoliens couplés au réseau électrique

Grâce aux progrès réalisés dans les interfaces d'électronique de puissance, différentes architectures et configurations de systèmes de conversion d'énergie éolienne ont été développées et par conséquent des opportunités d'utilisation de divers types de générateurs ont été créées [Abd 18]. On peut recenser deux types d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : Les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable.

I.8.1 Éolienne à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers d'un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à -1% [Idj 10].

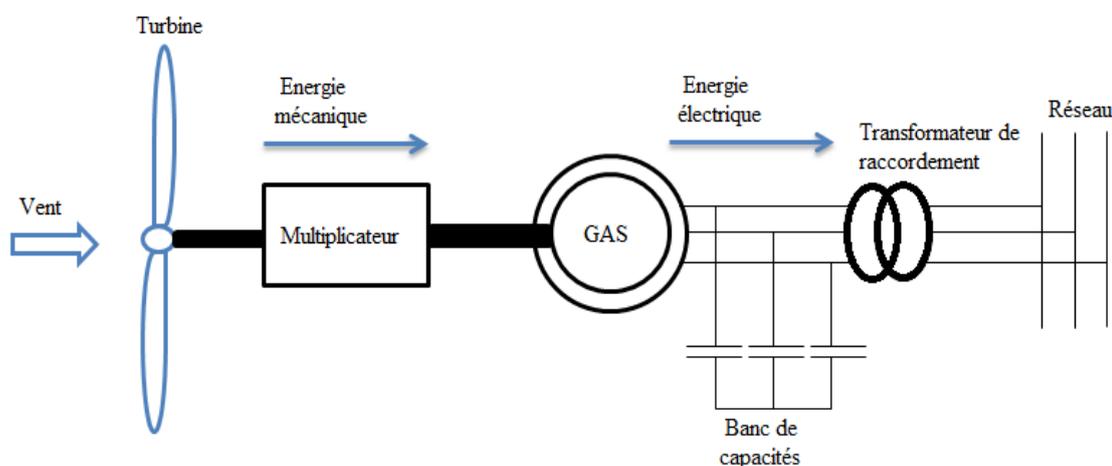


Figure I.6 : Système éolien basé sur une GAS à cage à vitesse fixe

Avantages :

- Système électrique plus simple ;
- Plus grande fiabilité ;
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;
- Pas besoin de système électrique de commande ;
- Moins cher.

I.8.2 Éolienne à vitesse variable

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses du vent exploitables [Idj 10].

On peut remédier à ces deux principaux inconvénients grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent et de réduire les nuisances sonores [Add 13].

Des convertisseurs d'électronique de puissance sont normalement utilisés pour un découplage partiel ou total entre la vitesse de rotation du générateur et la fréquence du réseau électrique [Abd 18]. Cette interface d'électronique de puissance est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [Idj 10].

Avantages :

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

Dans ce qui suit, nous exposons brièvement les quelques structures les plus utilisées dans ce mode de fonctionnement connecté au réseau électrique.

I.8.2.1 Machine asynchrone**A. Machine asynchrone à cage**

La génératrice asynchrone à cage, figure I.7, peut fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance, et peut générer une production de puissance électrique sur une large plage de vitesse de vent [Aou 17].

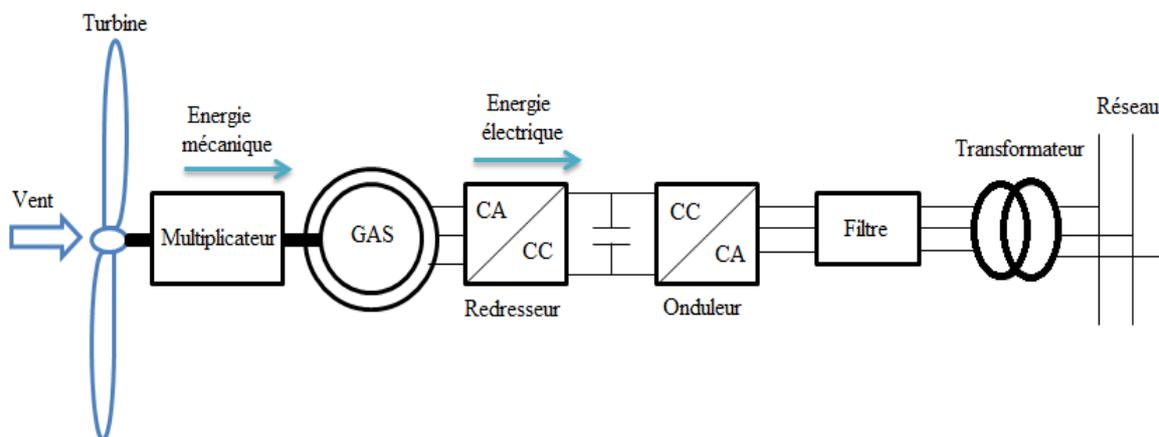


Figure I.7 : Système éolien basé sur GAS à cage connecté au réseau électrique via un convertisseur statique CA/CC/CA

B. Machine asynchrone à double alimentation partiellement interfacée avec le réseau

Actuellement, une majorité de projets éoliens de forte puissance reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone à rotor bobiné. Cette machine est connue sous le nom de machine asynchrone double alimentée (MADA). La double alimentation fait référence à l'alimentation en tensions de ses deux armatures, le stator et le rotor [Abd 18].

Pour cette structure, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau électrique alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques comme montré sur la figure I.8 [Aou 17] :

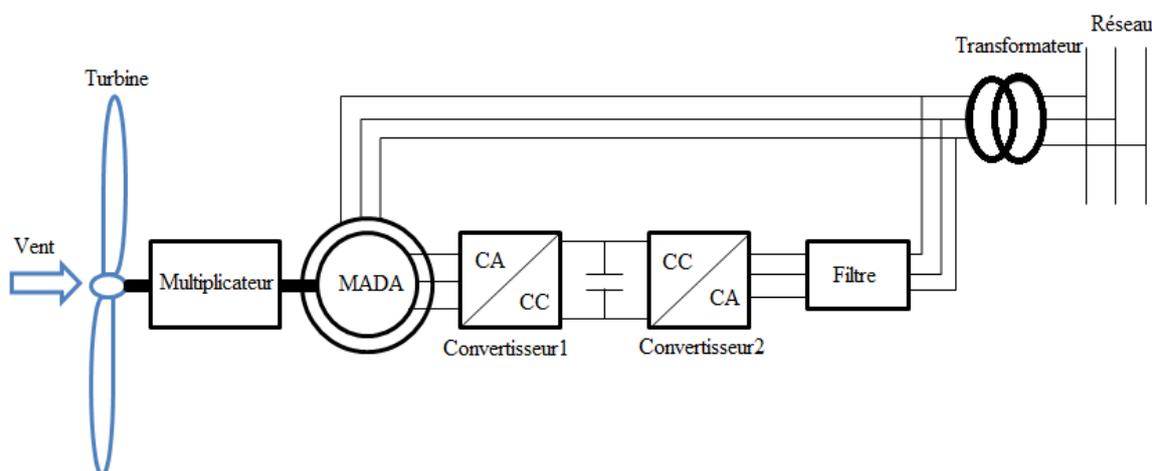


Figure I.8 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA partiellement interfacée avec le réseau

C. Machine asynchrone à double alimentation totalement interfacée avec le réseau

Une autre structure d'éolienne basée sur la MADA est également envisagée, une structure dont le stator et le rotor sont tous les deux interfacés avec le réseau via des convertisseurs d'électronique de puissance. Comme montré sur la figure I.9, la configuration fait appel à trois convertisseurs d'électronique de puissance, un

convertisseur AC/DC coté stator, un convertisseur AC/DC coté rotor et un troisième DC/AC coté réseau, ces trois convertisseurs sont alors connectés à un seul bus continu commun. Le système est ainsi découplé du réseau électrique [Aou 17].

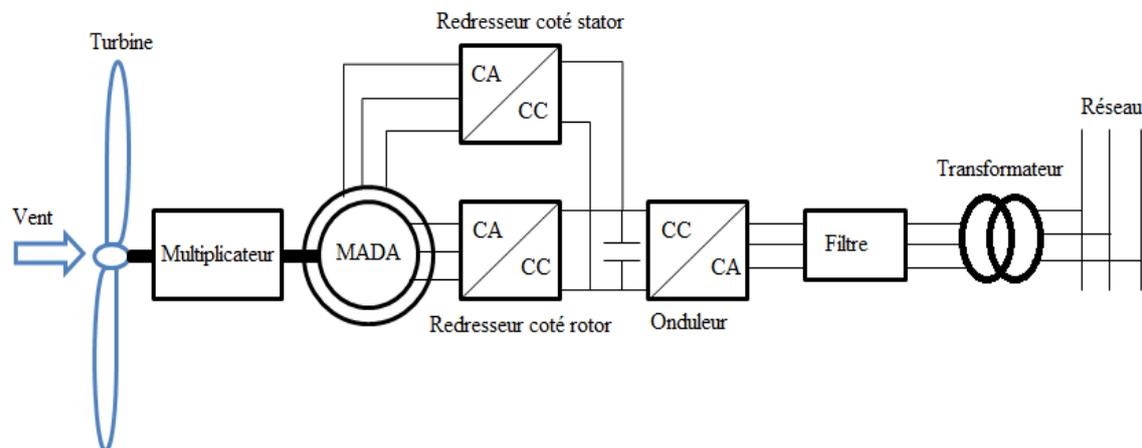


Figure I.9 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA totalement interfacée avec le réseau

I.8.2.2 Machine synchrone

A. Machine synchrone à rotor bobiné

Les éoliennes basées sur une génératrice synchrone à rotor bobiné sont intéressantes dans la mesure où le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit contrôlé au travers de l'onduleur souvent à MLI. Toutefois, elles requièrent un système de bagues balais qui nécessite un entretien régulier [Idj 10].

B. Machine synchrone à aimants permanents

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues/balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrone à aimants permanents à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur comme illustré sur la figure I.10 [Aou 17].

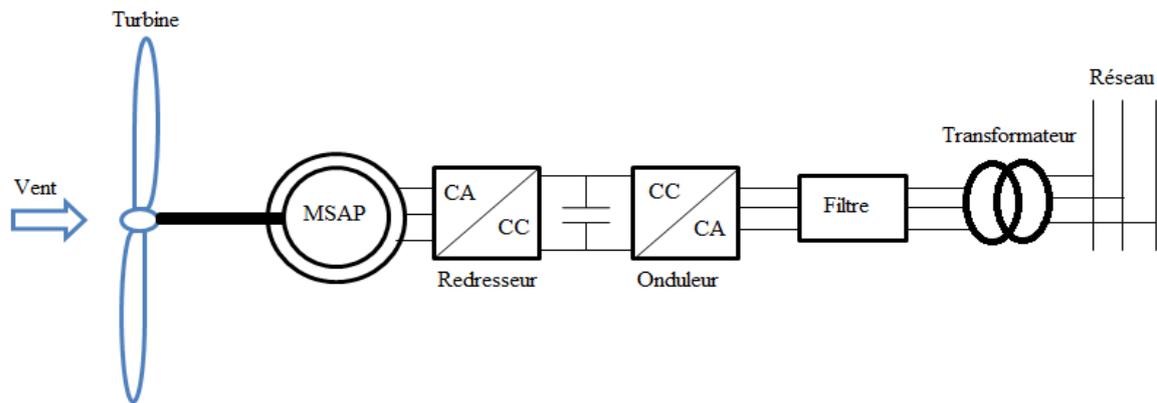


Figure I.10 : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents raccordée au réseau

I.9 Système éolien en fonctionnement isolé et autonome

Un système autonome et isolé est l'appellation commune pour décrire des systèmes de production d'électricité alimentant des installations électriques n'étant pas raccordées au réseau de distribution, soit par l'inexistence de celui-ci, soit par contrainte technique et/ou financière, soit par volonté de l'utilisateur dans une démarche personnelle [Sur 20]. Un site isolé peut être un gîte, une ferme de montagne ou encore une île. On utilise en générale des machines de petites puissances, dans le cas de fonctionnement autonome les grandeurs statoriques ne sont plus imposées et il faut fournir à la machine la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation.

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux conventionnels. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible [Idj 10].

Dans cette partie, nous présenterons les différentes solutions de conversion d'énergie mécanique utilisées dans ces applications de petites puissances pour les systèmes isolés et autonomes.

I.9.1 Machine synchrone

I.9.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante [Mir 05].

I.9.1.2 Machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contre balancées par un cout plus élevé

que les machines asynchrones et synchrones classiques. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent.

La configuration de référence est celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas de la figure I.11, il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation [Idj 10].

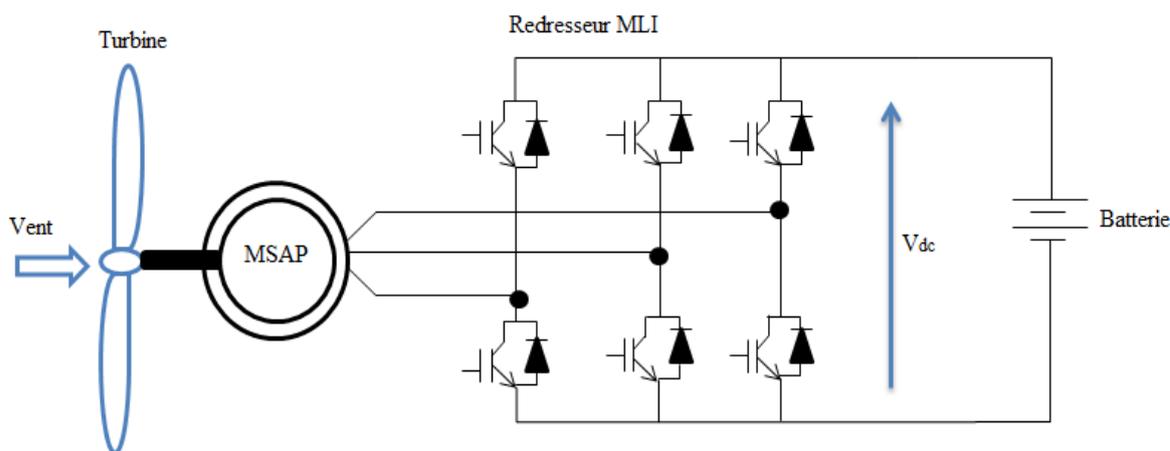


Figure I.11 : Eolienne basée sur une machine synchrone connectée à un redresseur MLI

I.9.2 Machine asynchrone

I.9.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone à cage est l'une des machines les plus utilisées pour des applications en conversion éolienne autonome ou isolé et ce pour des raisons de robustesse et de prix. En effet, cette structure est démunie de contacts électriques par ballais-collecteurs et les aimants permanents lui confèrent robustesse et longévité [El-Aim 04].

A. Machine asynchrone auto-excitée

L'utilisation de la machine asynchrone à cage connecté à des capacités a l'avantage de la simplicité de mise en œuvre et le faible coût dû à l'absence de convertisseurs statiques [Idj 10].

Cependant, des solutions simples avec des batteries de condensateurs commutées ne sont pas adaptées à une utilisation pratique en raison des variations de l'amplitude et de la fréquence des tensions lors des variations de charge et de vitesse de rotation. Une solution acceptable nécessiterait un contrôle approprié de la fréquence et la tension. Des commandes plus sophistiquées utilisant un compensateur statique connecté en parallèle avec le stator sont proposées afin de maintenir la tension constante [Abd 18].

Il existe plusieurs configurations dans la littérature pour connecter les capacités aux machines. Une d'elle consiste à utiliser une capacité et l'autre solution consiste à utiliser un banc de capacités constitué de trois (3) condensateurs connectés en étoile ou en triangle aux bornes de la génératrice [Idj 10].

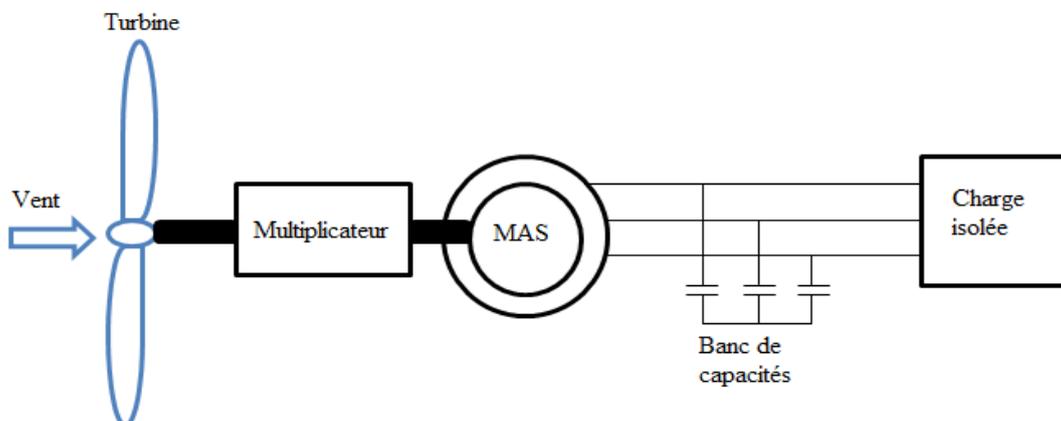


Figure I.12 : Eolienne basée sur une MAS auto-excitée avec une batterie de condensateur

B. Machine asynchrone totalement interfacée

Différentes configurations de machines asynchrones à cage d'écureuil alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent. Ces configurations permettent de maintenir la tension à une valeur constante aux bornes de la charge et ceci lorsque le système est placé dans un environnement dynamique où la vitesse et la charge changent [Abd 18]. Deux configurations sont données sur les deux figures I.13 et I.14 :

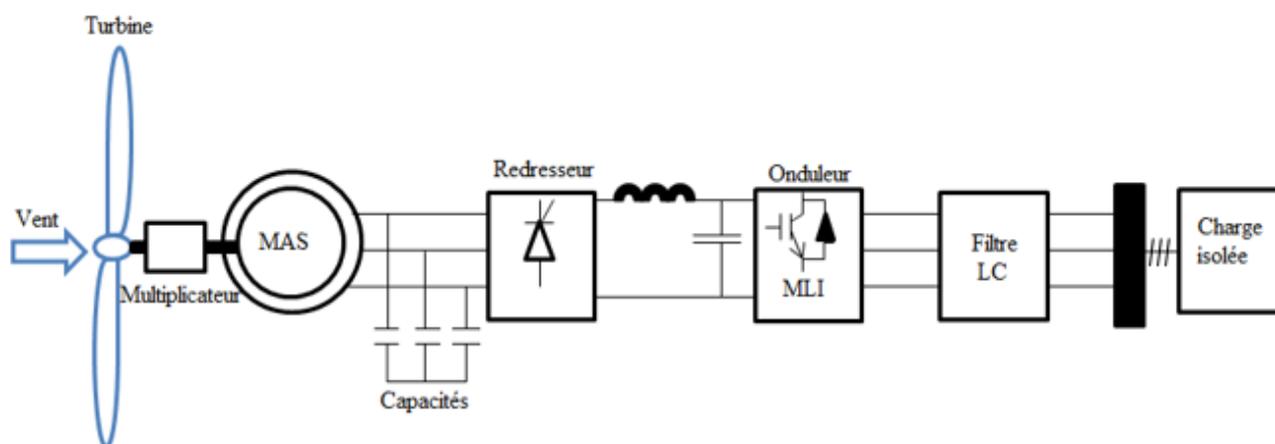


Figure I.13 : Structure avec ponts de diodes et onduleur MLI

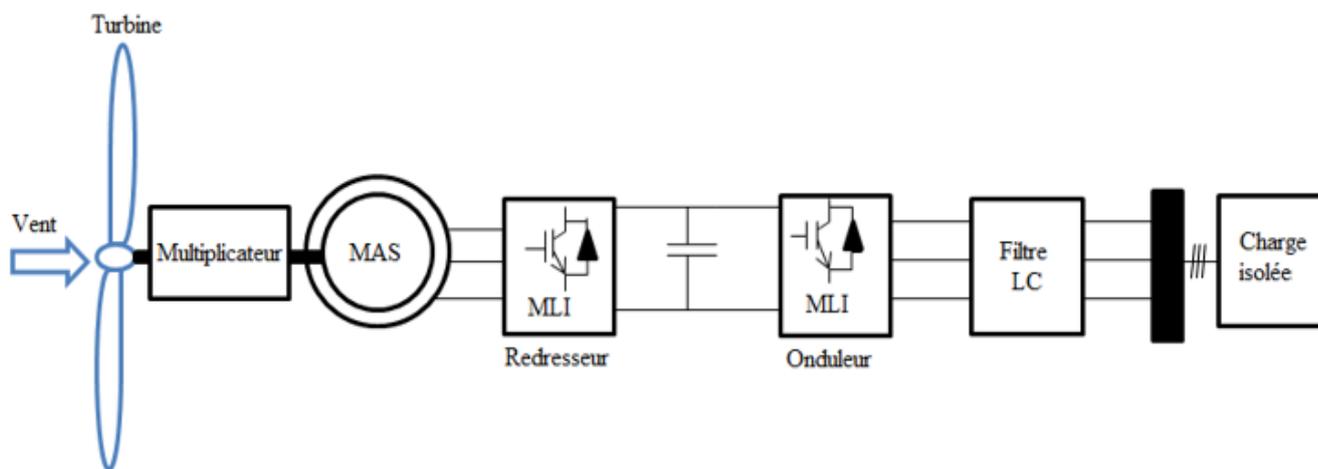


Figure I.14 : Structure à base de deux convertisseurs MLI

La configuration de la figure I.13 utilise l'association d'un redresseur mixte et d'un filtre pour adapter la forme d'onde produite par la génératrice au bus CC. La régulation de la tension continue à la valeur imposée peut se faire en agissant sur la commande des thyristors. Cette structure est caractérisée par sa simplicité de réalisation, mais elle ne permet pas de contrôler la magnétisation de la machine [Abd 18].

La configuration de la figure I.14 est constituée d'une génératrice asynchrone connectée à un redresseur et un onduleur de tension à MLI. Cette structure permet le contrôle, par une commande adaptée, la magnétisation et la tension à la sortie de la génératrice asynchrone lorsque la vitesse du rotor et la charge électrique sont variable. L'inconvénient majeur de l'architecture avec convertisseurs statiques entre la génératrice et la charge demeure le coût relativement élevé et la complexité de la commande [Idj 10].

I.9.2.2 Machine asynchrone à double alimentation

Pour des systèmes isolés, la MADA, comparée aux structures à base des machines asynchrones à cage, peut constituer une alternative nettement meilleure grâce à des énormes gains économiques résultant de la réduction des tailles des convertisseurs de puissance et des filtres. Un autre avantage des systèmes avec MADA est que le stator peut être excité à partir du rotor via les convertisseurs de puissance, et donc le besoin d'un compensateur d'énergie réactive externe peut être éliminé [Abd 18].

A. Machine asynchrone à double alimentation partiellement interfacée

Dans la configuration montrée sur la figure I.15, l'écoulement de la puissance active à travers le stator est unidirectionnel, tandis que le sens d'écoulement de puissance à travers le rotor dépend du mode de fonctionnement du générateur (mode hypo synchrone, mode hyper synchrone ou mode synchronisme). La puissance réactive nécessaire peut être générée soit par le convertisseur coté rotor CCR ou par le convertisseur côté stator CCS. En vue d'assurer l'autonomie du système, le circuit du bus continu peut être associé à un système de stockage d'énergie [Abd 18].

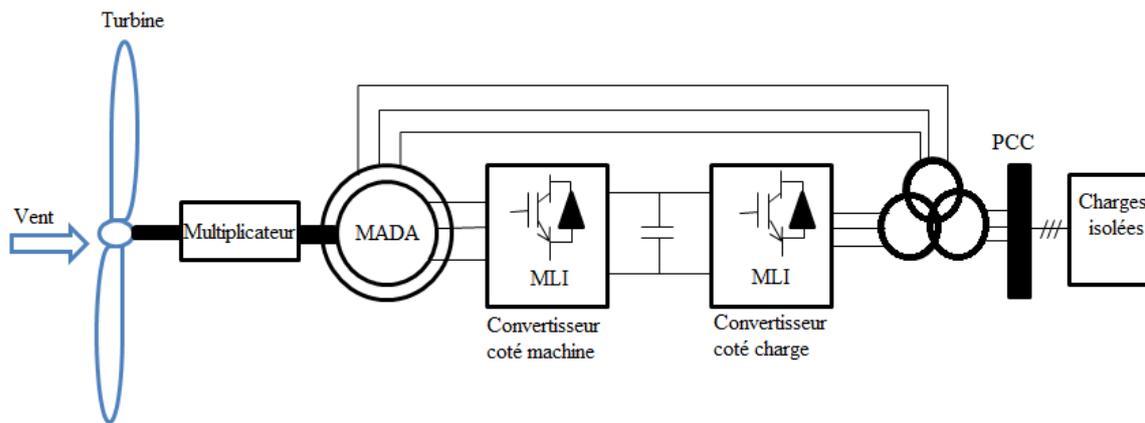


Figure I.15 : MADA en fonctionnement autonome partiellement interfacée

B. Machine asynchrone à double alimentation totalement interfacée

Dans la configuration montrée sur la figure I.16, le stator et le rotor sont alimentés par deux convertisseurs indépendants. Avec cette solution, la MADA peut être contrôlé depuis le stator ou le rotor par différentes combinaisons possibles, il est possible et préférable de répartir la puissance électrique fournie et les impulsions entre le stator et le rotor. La MADA avec des convertisseurs connectés aux côtés stator et rotor se caractérise par son fonctionnement stable sur une plage de vitesse (de synchrone à double vitesse synchrone) (ce que fait diminuer la complexité de la boîte à vitesse de l'éolienne), la puissance générée peut atteindre le double de la puissance de sortie de la machine à induction conventionnelle à près du double de la vitesse synchrone. La puissance est extraite du stator et du rotor de la machine et la puissance totale peut être partagée arbitrairement entre les côtés de la machine. De plus, avec cet agencement, le courant d'excitation peut être partagé également. Ce faisant, la conception de l'enroulement (volume de cuivre) et les pertes dans la machine peuvent être optimisées, et la taille de la machine peut être réduite.

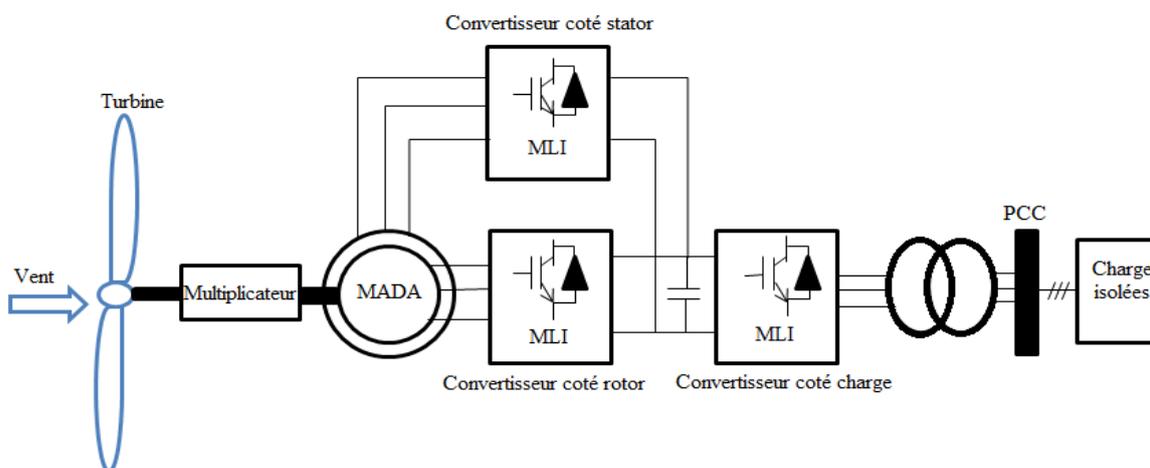


Figure I.16 : MADA en fonctionnement autonome totalement interfacée

C. Modes de fonctionnement de la MADA

Dans la MADA, 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 synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode génératrice. Dans ce qui suit, nous présenterons les deux fonctionnements en mode génératrice [Mes 17] :

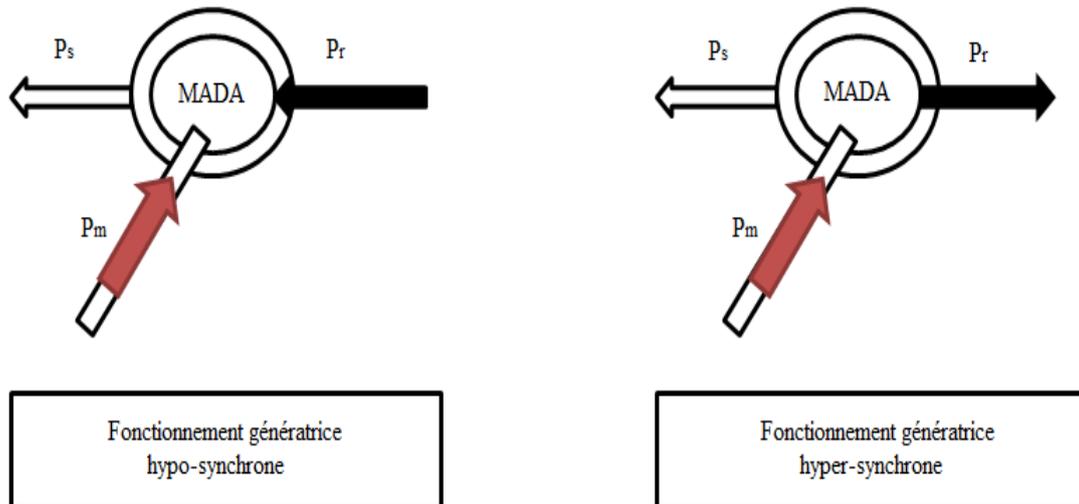


Figure I.17 : Modes de fonctionnement de la GADA

Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone :

- La puissance est fournie par le stator au réseau ;
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor ;
- La vitesse de rotation est en-dessous de la vitesse de synchronisme ;
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone :

- La puissance est fournie par le stator au réseau ;
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau ;
- La vitesse de la machine est au-dessus de la vitesse de synchronisme ;
- La machine asynchrone à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions.

D. Méthode pour l'excitation initiale de la MADA

Une MADA opérant de façon autonome dans un système de production d'électricité isolé où aucune alimentation externe n'est disponible, a besoin d'une excitation initiale pour produire sa propre tension. Pour fournir cette dernière, plusieurs méthodes sont énumérées ci-dessous [Abd 18].

D.1 Utilisation d'un élément de stockage externe

Cette méthode consiste à connecter une petite batterie ou un super condensateur au bus de tension continue comme montré sur la figure I.18. Le système de stockage externe permet de charger le condensateur du bus continu pour ainsi démarrer le processus d'établissement du flux dans la machine.

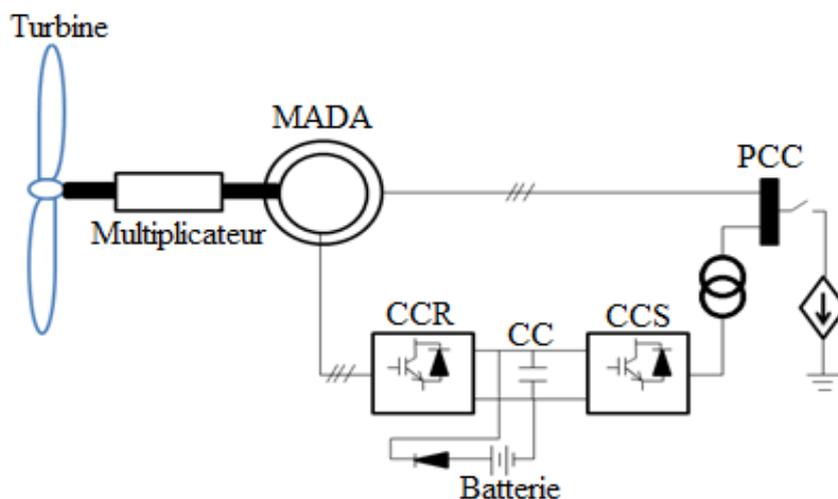


Figure I.18 : Schéma d'amorçage par élément du stockage au bus CC

D.2 Utilisation d'un banc de capacité au stator

Une deuxième méthode consiste à utiliser la rémanence du circuit magnétique de la machine et un banc de capacité supplémentaire connecté au stator, comme montré sur la figure I.19. Le banc de capacité permet de compenser une partie de la puissance réactive nécessaire à l'excitation de la machine.

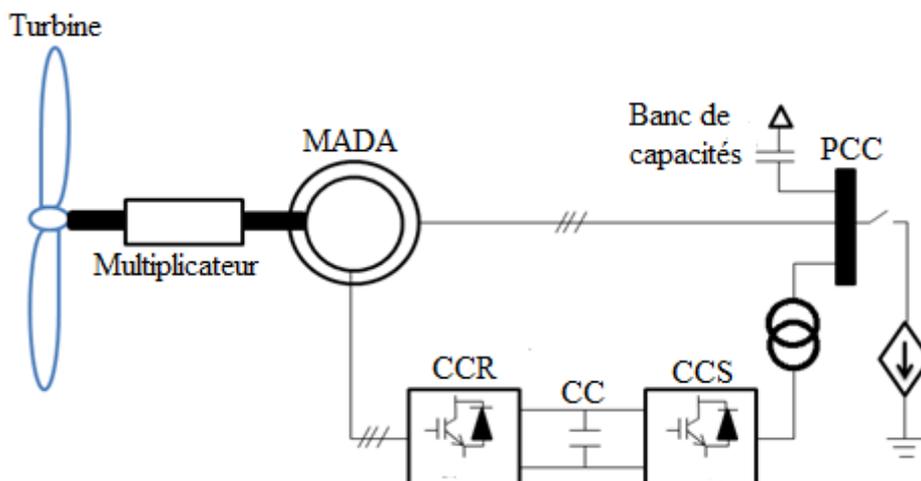


Figure I.19 : Schéma d'amorçage par un banc de capacités au stator

D.3 Utilisation d'une génératrice à aimants placée sur le même arbre

Dans cette troisième méthode, une génératrice synchrone à aimants permanents est placée sur le même arbre de rotation que la MADA comme montré sur la figure I.20. La GSAP permet la charge préliminaire du condensateur CC via le redresseur à diodes permettant ainsi la magnétisation de la MADA.

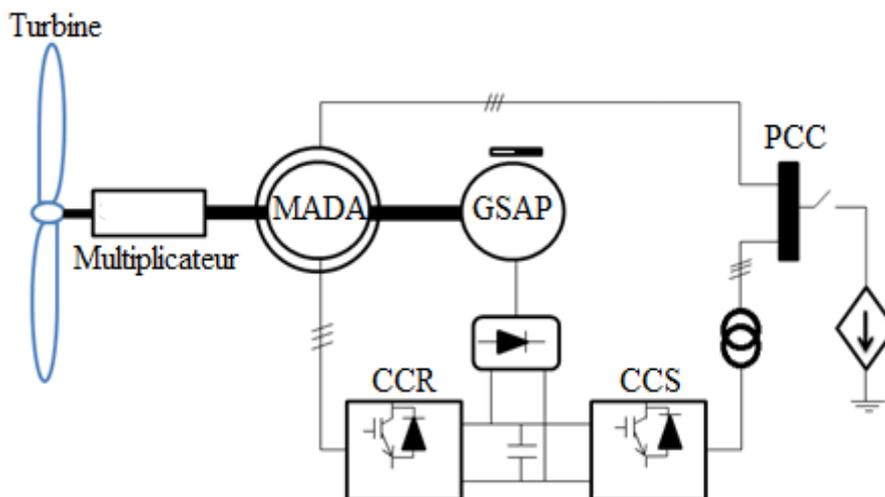


Figure I.20 : Schéma d'amorçage par une GSAP placée sur le même arbre

D.4 Technique d'amorçage sans source extérieure

Cette méthode évite l'utilisation de tout support matériel supplémentaire connecté soit au rotor soit au stator. Le processus d'excitation de la machine est déclenché à partir d'une petite quantité d'énergie initiale provenant de la tension générée par le magnétisme rémanent de la machine. Cette technique sera développée dans les prochains chapitres.

E. Avantages de la MADA

Les avantages de l'utilisation de la MADA dans les systèmes éoliens peuvent être résumés comme suit [Abd 18] :

- Possibilité de fonctionner dans une large gamme de la vitesse du vent ;
- Amélioration de l'efficacité du système en ce qui concerne la réduction des pertes dans les petits convertisseurs et les filtres harmoniques ;
- Coût de production moins élevé en raison de la taille des convertisseurs et des filtres ;
- Possibilité de produire une puissance électrique supérieure à la valeur nominale ;
- Possibilité de contrôler le facteur de puissance.

I.10 Systèmes de stockage de l'énergie électrique

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production électrique, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est la source d'électricité qui croît le plus rapidement dans le monde. Cependant, une caractéristique importante de l'énergie éolienne est la fluctuation de la puissance produite au fil du temps. Or, la stabilité du réseau repose sur l'équilibre entre production et consommation. Pour cela, l'idée de stockage a été exploitée. En effet, ce dernier représente la clé de pénétration de l'énergie éolienne dans un système électrique car il fournit non seulement une solution technique au gestionnaire du réseau pour assurer en temps réel l'équilibre production/consommation, mais il permet également d'exploiter au maximum les ressources d'énergies renouvelables en évitant le délestage.

Il existe à l'heure actuelle plusieurs méthodes de stockage d'énergie qui peuvent être classées en deux catégories [Cde 20] :

- ✓ **Stockage à court terme** : Pour cette catégorie, le temps de stockage est inférieur à 10 minutes. Ce type est utilisé pour lisser les fluctuations de puissance produite par la ferme éolienne et pour régler la tension et la fréquence du réseau (réglage primaire). Les plus importants systèmes de stockage à court terme sont : le volant d'inertie, le supraconducteur et le super condensateur ;
- ✓ **Stockage à long terme** : Le temps de stockage est supérieur à 10 minutes. Ce type est utilisé pour répondre aux pics d'appels de puissance aux heures de pointe du réseau électrique et en cas d'absence du vent. Les plus importants stockages à long terme sont : le pompage/turbinage hydraulique (STEP), le compresseur d'air, la batterie électrochimique et l'hydrogène.

I.11 Choix de la structure en fonctionnement autonome qui sera étudié dans les prochains chapitres

Le « petit éolien » couvre la gamme des puissances de 20W à 100 kW réparties en trois catégories : micro-éoliennes de 20W à 500W, mini-éoliennes de 500W à 1kW et petites éoliennes de 1kW à 100kW [Idj 10].

Dans les installations autonomes et isolées, le but est de concevoir un système le moins coûteux possible tout en assurant des performances les plus élevées possibles et une bonne qualité d'énergie. Dans ce cadre et en vue des avantages des systèmes éoliens basés sur une MADA cités précédemment, les prochains chapitres seront basés sur l'étude du système éolien de la figure I.16.

A cause du caractère aléatoire et imprévisible de l'énergie du vent, il est évident que pour un système éolien, sans sources d'énergie auxiliaire ou un système de stockage d'énergie approprié, ne peut assurer en toutes circonstances une alimentation sans interruption aux charges connectées. Bien que l'intégration de tels dispositifs soit nécessaire pour avoir de meilleures performances d'opération, notre objectif est de faire l'étude d'un système autonome en supposant que l'énergie éolienne nécessaire est disponible.

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève description de chaînes de conversion de l'énergie éolienne. Nous avons tout d'abord introduit le principe de la conversion de l'énergie éolienne puis donné un aperçu des deux grandes familles d'éoliennes, à savoir celles à axe horizontal et celles à axe vertical. Une fois les différents constituants d'une éolienne présentée, nous avons donné les deux techniques de régulation de la puissance d'une turbine. Ensuite, dans une seconde partie, nous avons abordé les systèmes éoliens de grande production connectés au réseau électrique en présentant les structures les plus répandues. Enfin, notre étude étant centrée sur l'utilisation de la conversion de l'énergie éolienne pour des sites isolés, la dernière partie de ce chapitre a été consacrée à introduire les différentes solutions utilisées dans ce cadre. Nous avons présenté les architectures utilisées pour assurer ce fonctionnement tout en expliquant les différentes variantes.

Au travers de l'étude des solutions existantes, il apparaît que la structure basée sur la MADA totalement interfacé avec la charge est la plus intéressante de point de vue caractéristique et performances, ce qui favorise son utilisation pour l'alimentation de sites isolés dans diverses contrées.

L'objectif de notre étude est de quantifier les performances de cette structure dans les cas les plus simples, et les moins onéreux, de fonctionnement en générateur autonome autant que ceux, plus complexes et coûteux, utilisant des convertisseurs et donc une commande.

Ces différents objectifs passent par une étape incontournable qui consiste à élaborer un modèle de la structure qui soit le plus simple et le plus précis possible, c'est l'objet du deuxième chapitre de ce mémoire.

Chapitre II

Modélisation des différentes parties d'un système autonome éolien à base d'une GADA

II.1 Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien étudié.

Dans ce chapitre, nous procéderons à la description du système global étudié, puis nous modéliserons les différentes parties qui le constituent.

La modélisation des différents éléments mis en jeu dans la chaîne, a pour but de simuler le comportement du système global dans les prochains chapitres.

II.2 Description générale du système éolien étudié

Le schéma global du système éolien autonome étudié est illustré sur la figure II.1. La MADA est entraînée par une turbine éolienne à axe horizontal à vitesse variable via un multiplicateur de vitesse. Le stator et le rotor de la génératrice sont connectés à la charge via des convertisseurs de sources de tension composés d'un convertisseur MLI coté stator, d'un convertisseur MLI coté rotor et d'un convertisseur MLI coté charge avec un condensateur du bus continu.

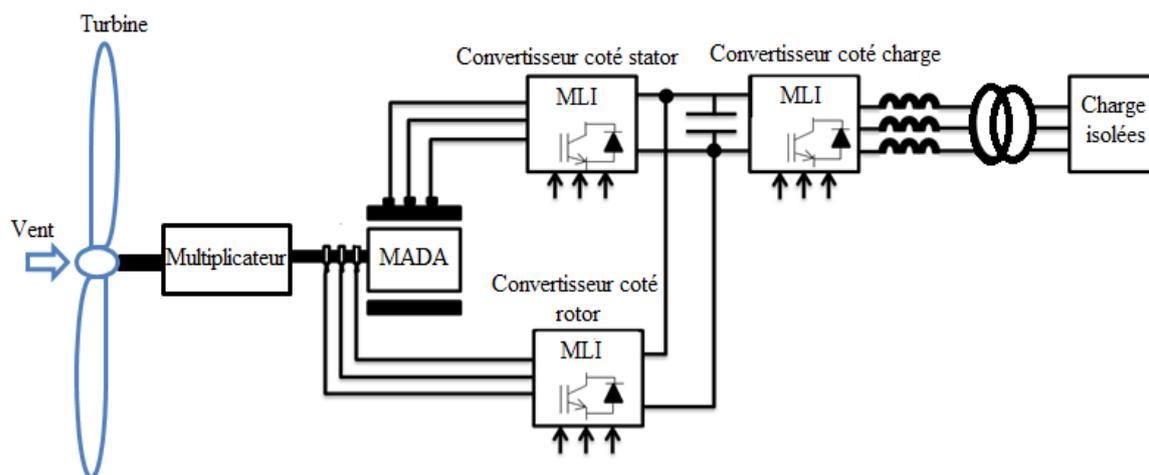


Figure II.1 : Système éolien étudié à base d'une MADA totalement interfacé

II.3 Modélisation du système éolien étudié

II.3.1 Modélisation du vent

La première étape nécessaire pour un projet de production éolienne est le choix géographique du site. Les propriétés du vent sont intéressantes pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie éolienne, puisque sa puissance, dans les conditions idéales, est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Pour connaître les caractéristiques d'un site, il est indispensable d'avoir des mesures de la vitesse du vent et de sa direction, sur une grande période du temps. Le modèle du vent utilisé dans notre étude est donné par la relation approximée suivante [BAGB 17] :

$$v(t) = 9,5 + 0,8 \sin\left(\frac{0,2\pi}{10} \cdot t\right) + 0,8 \sin\left(\frac{\pi}{10} \cdot t\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{10} \cdot t\right) \quad (\text{II.1})$$

II.3.2 Modélisation d'une turbine éolienne

Le dispositif, qui est étudié ici, est composé d'une turbine éolienne à axe horizontal comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice électrique à travers un multiplicateur de vitesse de gain G comme illustré sur la figure II.2.

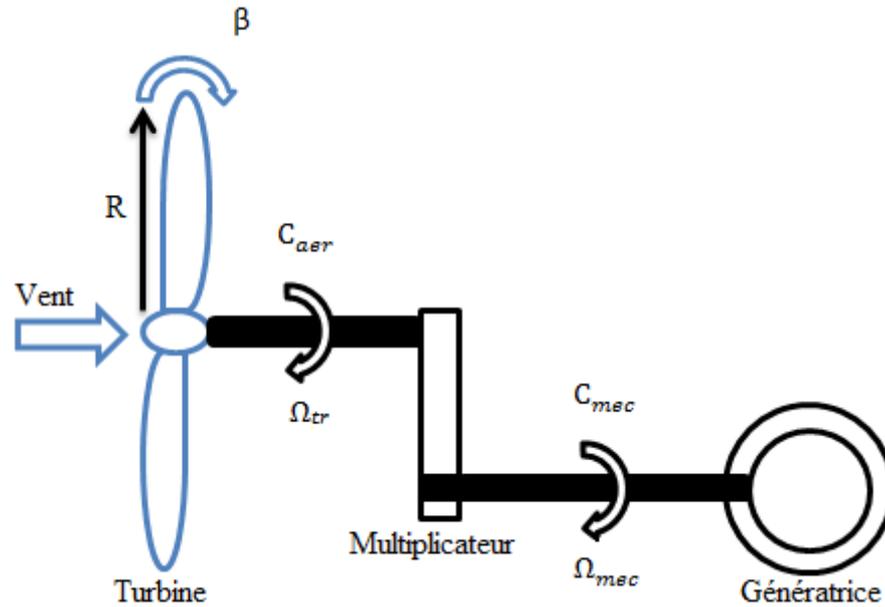


Figure II.2 : Turbine éolienne connectée à une génératrice via un multiplicateur de vitesse

II.3.2.1 Modèle aérodynamique

La puissance du vent disponible est définie de la manière suivante :

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

Où : ρ : Densité de l'air (approximativement $1,22 \text{ kg/m}^3$) ; S : Surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale ; v : Vitesse du vent.

La puissance aérodynamique capturée par une turbine $P_{aéro}$ est définie de la manière suivante :

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

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne, il diffère pour chaque éolienne.

Pour notre étude, on utilisera le C_p d'une éolienne de petite puissance dont la formule approximative est donnée ci-dessous [Zai 14] :

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

Avec : β : Angle d'inclinaison des pales ; λ : Ratio de la vitesse.

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire en bout des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{tr} \cdot R}{v} \quad (\text{II.5})$$

Avec : Ω_{tr} : Vitesse de rotation de la turbine.

La limite supérieure théorique du coefficient de puissance, appelée limite de Betz, est de 59% [Abd 18]. La figure II.3 nous donne les différentes courbes du C_p utilisé dans notre système pour différents angles β .

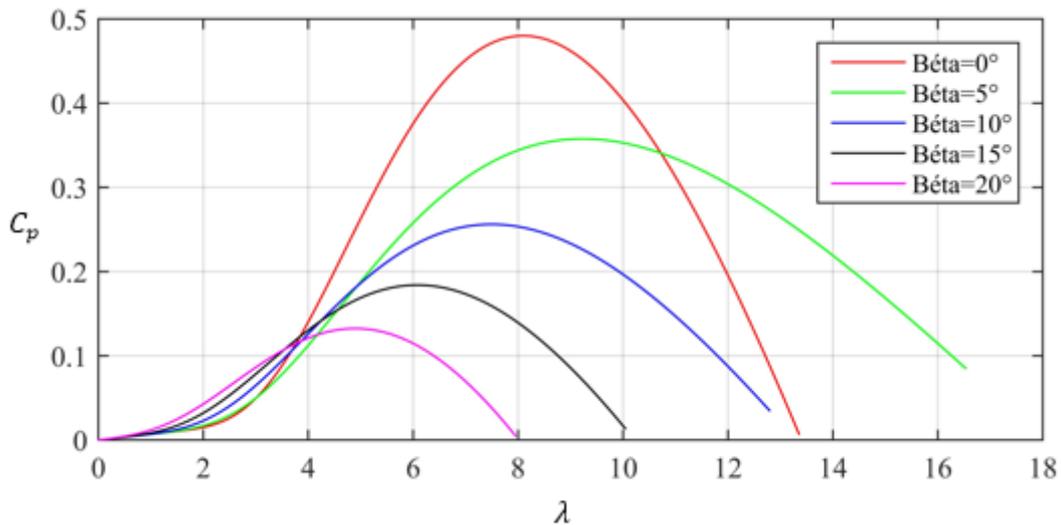


Figure II.3 : Caractéristiques $C_p(\lambda, \beta)$ de l'éolienne étudiée

Dans notre étude, nous serons intéressés uniquement par la courbe correspondant à $\beta = 0$. Cela est dû au fait que sur une petite éolienne, il est préférable de ne pas changer l'angle de calage des pales car cela revient à produire une éolienne plus chère.

Le couple aérodynamique est déterminé par l'équation suivante :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{tr}} \quad (\text{II.6})$$

II.3.2.2 Modèle de Multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (\text{II.7})$$

$$\Omega_{tr} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.8})$$

Où : Ω_{mec} : Vitesse mécanique du générateur.

II.3.2.3 Modèle de l'arbre mécanique

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_{tr} et comprend la masse des pales, la masse du moyeu et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice elle-même.

$$J = \frac{J_{tr}}{G^2} + J_g \quad (II.9)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor de la génératrice. Ce couple mécanique est la résultante du couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple de la turbine ramenée à l'arbre rapide C_g [El-Aim 04] :

$$C_{mec} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (II.10)$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.11)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f [El-Aim 04] :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.12)$$

Le schéma bloc du modèle de la turbine est donné sur la figure II.4 :

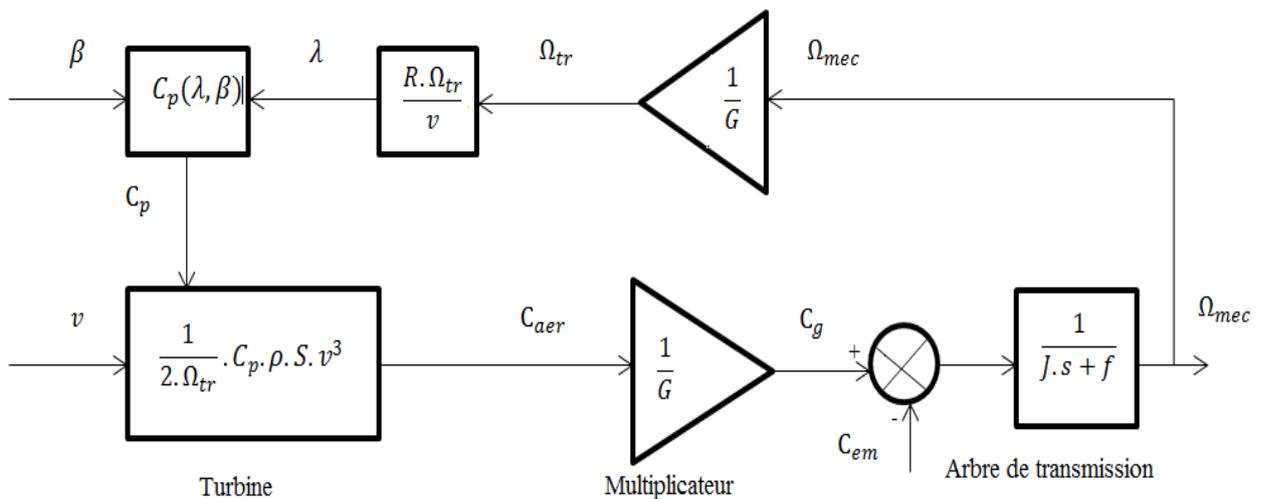


Figure II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine

II.3.3 Modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné

Pour établir un modèle moins complexe, mais suffisamment représentatif pour décrire le comportement de la machine, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes [Abd 18] :

- Linéarité : le flux embrassé par un enroulement est proportionnel au courant qui le crée, les parties en fer des circuits magnétiques ne sont pas saturées ;
- Premier harmonique : nous considérons que les champs ont une répartition sinusoïdale de l'espace ;
- Symétrie : les trois phases d'une armature statorique ou rotorique sont identiques et l'entrefer est considéré régulier ;
- Les pertes par hystérésis et courants de Foucault sont négligées ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.

II.3.3.1 Modélisation de cette machine dans le repère naturel (abc)

La figure II.5 représente la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique. Les enroulements statoriques sont stationnaires, alors que les enroulements rotoriques sont repérés par un angle variable θ qui représente la position angulaire électrique du rotor par rapport au stator.

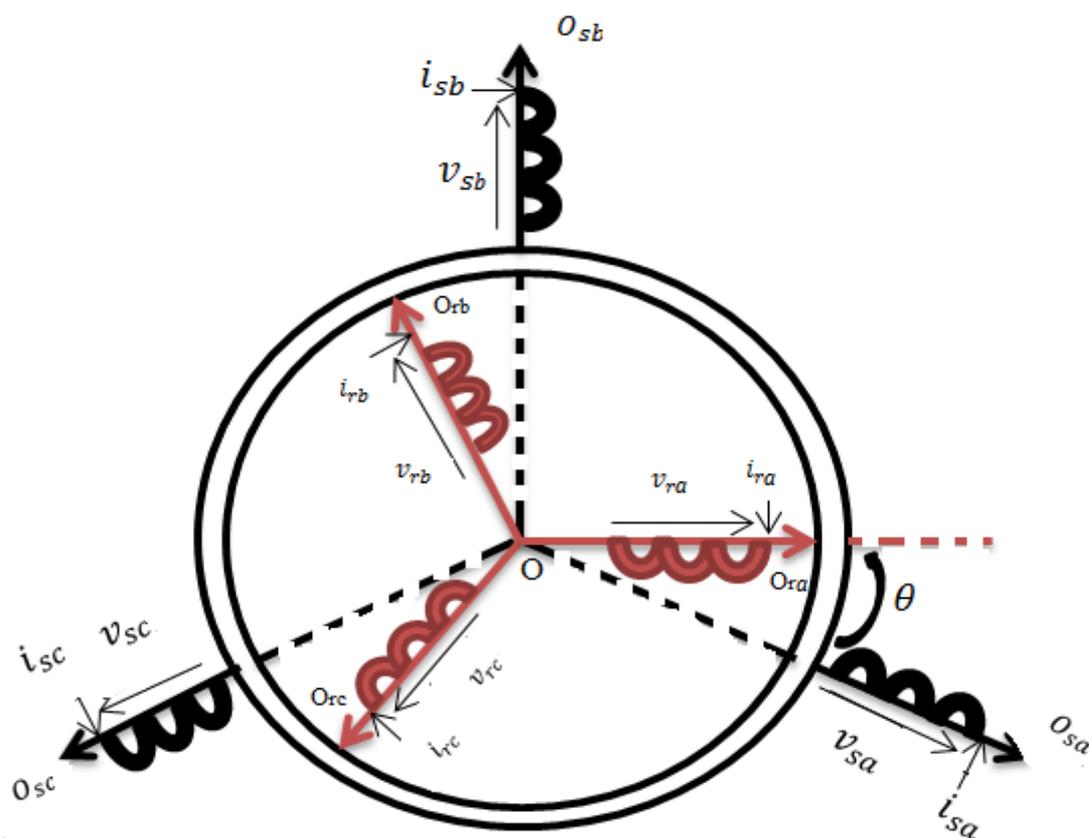


Figure II.5 : Représentation schématique de la machine asynchrone à rotor bobiné

A. Equations électriques de la machine asynchrone à rotor bobiné

Les équations électriques de la MADA dans le plan naturel (abc) sont données comme suit [BAGB 17] :

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ v_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ v_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \\ v_{ra} = R_r \cdot i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ v_{rb} = R_r \cdot i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ v_{rc} = R_r \cdot i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Avec : v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} : Tensions appliquées aux trois phases statoriques ; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants traversant les trois phases statoriques ; $\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Flux à travers ces enroulements ; v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} : Tensions rotoriques ; i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courants rotoriques ; $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Flux rotoriques ; R_s : Résistance d'une phase statorique ; R_r : Résistance d'une phase rotorique.

Le système d'équations II.3 peut être écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_{ss}] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [v_r] = [R_{rr}] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

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

$$[R_{ss}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_{rr}] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}.$$

B. Equations magnétiques de la machine asynchrone à rotor bobiné

Les équations magnétiques dans le repère triphasé (abc) s'expriment en fonction des courants en intervenant les différentes inductances [BAGB 17] :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{rs}] \cdot [i_s] \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

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

Avec : $[L_{ss}]; [L_{rr}]$: Matrices des inductances propres et mutuelles du stator et du rotor respectivement ; $[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

Où :

$$[M_{sr}] = l_m \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix};$$

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

l_s ; l_r : Inductances propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement ; l_{ms} ; l_{mr} : Inductances mutuelles entre phases statoriques et entre phases rotoriques, respectivement.

On pose : $l_m = l_{ms} = l_{mr}$

En remplaçant les équations II.15 dans les équations II.14, on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_{ss}] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [i_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \\ [v_r] = [R_{rr}] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [i_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [i_s]) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

C. Equation mécanique de machine asynchrone à rotor bobiné

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_g - C_{em} - C_{vis} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (\text{II.17})$$

II.3.3.2 Modélisation de cette machine dans le repère de Park (dq)

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

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

La figure II.6 illustre les repères de référence, statorique, rotorique et tournant.

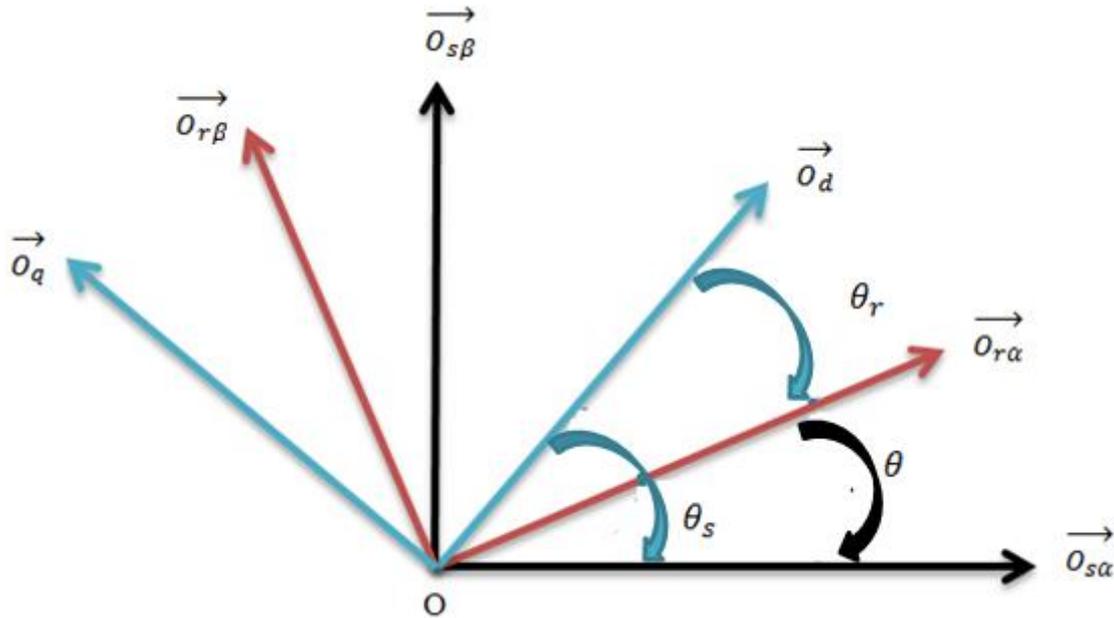


Figure II.6 : Repères de référence : statorique $s\alpha - s\beta$; rotorique $r\alpha - r\beta$; tournant dq

La relation angulaire suivante est définie :

$$\theta_s = \theta_r + \theta \quad (\text{II.18})$$

θ_s est la position angulaire relative de l'axe d du repère tournant (dq) par rapport à l'axe diphasé du stator noté $O_{s\alpha}$. θ_r est la position angulaire de l'axe d du repère tournant (dq) par rapport à l'axe diphasé du rotor noté $O_{r\alpha}$. Les vitesses angulaires de rotation sont obtenues comme suit :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \omega_s = \omega_r + \omega \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Avec : $\omega = p\Omega_{mec}$; p : Nombre de paires de pôles ; Ω_{mec} : Vitesse mécanique du rotor ; ω_s et ω_r représentent respectivement les pulsations des tensions statoriques et rotoriques ; ω : Vitesse électrique du rotor.

La matrice de transformation de Park qui permet le passage d'un système triphasé (abc) vers un système biphasé tournant (dq0) avec conservation de puissance est défini comme suit:

Pour le stator :

$$P(\theta_s) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Pour le rotor :

$$P(\theta_s - \theta) = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s - \theta) & \cos\left(\theta_s - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_s - \theta) & -\sin\left(\theta_s - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

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

Pour le stator :

$$P^t(\theta_s) = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Pour le rotor :

$$P^t(\theta_s - \theta) = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s - \theta) & -\sin(\theta_s - \theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

A. Equations électriques de la machine asynchrone à rotor bobiné

En appliquant la transformation de Concordia suivie par la matrice de rotation de Park, en tenant compte des hypothèses simplificatrices énoncées précédemment ainsi que de la relation angulaire définie par la formule II.18 et en négligeant les composantes homopolaires, nous pouvons établir les expressions des tensions statoriques et rotoriques dans le repère tournant (dq) :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rq} \\ v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

B. Equations magnétiques de la machine asynchrone à rotor bobiné

Les relations entre les flux et les courants sont données par le système suivant :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + L_m \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + L_m \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec : L_m : Inductance mutuelle cyclique ; $L_s; L_r$: Inductances cycliques statorique et rotorique, respectivement.

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques de la machine sont respectivement données par [Aou 17] :

$$\begin{cases} P_s = v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq} \\ Q_s = v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq} \\ P_r = v_{rd} \cdot i_{rd} + v_{rq} \cdot i_{rq} \\ Q_r = v_{rq} \cdot i_{rd} - v_{rd} \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Le couple électromagnétique est exprimé par [Aou 17] :

$$C_{em} = p(\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{II.23})$$

II.3.4 Modélisation des convertisseurs statiques

La figure II.7 représente le schéma des trois convertisseurs triphasés utilisés à base de composants semi-conducteurs commandables contrôlés par Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). En effet, notre système est composé d'un convertisseur coté rotor, d'un convertisseur coté stator et d'un convertisseur coté charge. Chaque convertisseur est constitué de trois branches, sur chaque branche on trouve deux interrupteurs $(K_{jj}, K'_{jj}, jj = 1,2,3)$, $(T_j, T'_j, j = 1,2,3)$ et $(Z_i, Z'_i, i = 1,2,3)$ composés d'un transistor et d'une diode chacun. Le contrôle des trois convertisseurs est assuré par les signaux S_{rjj} , S_{sj} et S_{gi} issus de la commande MLI.

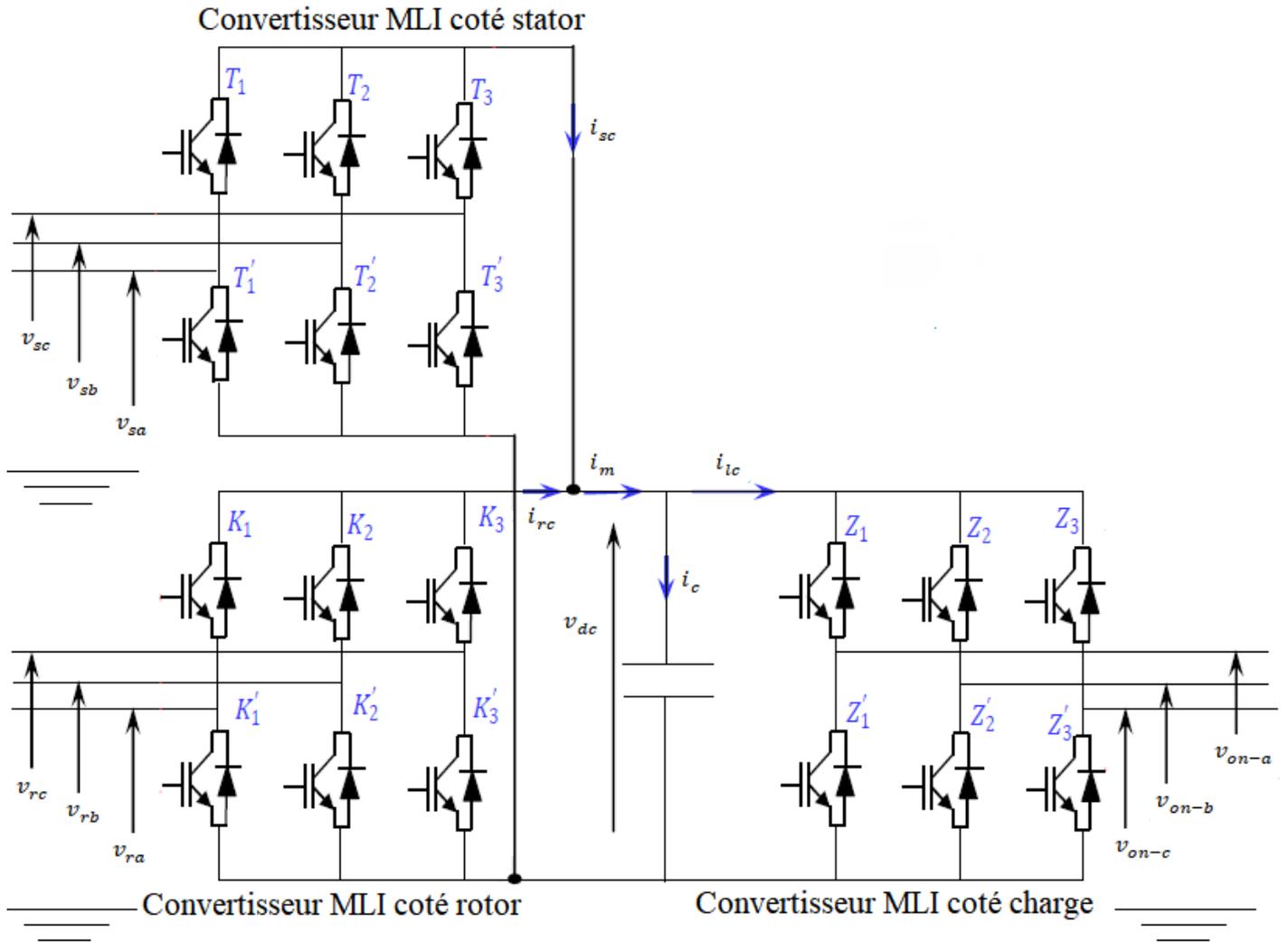


Figure II.7 : Convertisseurs statiques

Pour chaque convertisseur, on définit une fonction de connexion logique comme suit :

$$S_{rjj} = \begin{cases} 1 \Rightarrow K_{jj} \text{ fermé et } K'_{jj} \text{ ouvert} \\ 0 \Rightarrow K_{jj} \text{ ouvert et } K'_{jj} \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_{sj} = \begin{cases} 1 \Rightarrow T_j \text{ fermé et } T'_j \text{ ouvert} \\ 0 \Rightarrow T_j \text{ ouvert et } T'_j \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_{gi} = \begin{cases} 1 \Rightarrow Z_i \text{ fermé et } Z'_i \text{ ouvert} \\ 0 \Rightarrow Z_i \text{ ouvert et } Z'_i \text{ fermé} \end{cases}$$

On suppose que la commutation des interrupteurs est instantanée et la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable. Le modèle moyen du convertisseur coté rotor, du convertisseur coté stator et du convertisseur coté charge sont donnés par les équations (II.24), (II.25) et (II.26) respectivement [Aou 17] :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{r1} \\ S_{r2} \\ S_{r3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{s1} \\ S_{s2} \\ S_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$\begin{bmatrix} v_{on-a} \\ v_{on-b} \\ v_{on-c} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{g1} \\ S_{g2} \\ S_{g3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

II.3.4.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle

L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement [All 17].

La MLI sinus-triangle est réalisée par la comparaison d'une onde sinusoïdale basse fréquence (référence) à une onde triangulaire haute fréquence (porteuse), les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la référence.

Deux caractéristiques de MLI sont nécessaires à savoir [All 17] :

- Indice de modulation I_m : Il est égal au rapport de la fréquence de la modulation (porteuse) f_p sur la fréquence de référence $f_{réf}$. L'augmentation de la valeur I_m conduit au déplacement des harmoniques vers les fréquences élevées, ce qui présente un avantage, mais on constate par contre une augmentation de déchet de tension, d'où il est nécessaire d'optimiser la valeur de I_m .

$$I_m = \frac{f_p}{f_{réf}} \quad (\text{II.27})$$

- Taux de modulation T_m : c'est un coefficient de réglage de la tension qui est égale au rapport de l'amplitude de la tension de référence $v_{réf}$ à l'amplitude de la porteuse v_p .

$$T_m = \frac{v_{réf}}{v_p} \quad (\text{II.28})$$

Le schéma de principe est donné sur la figure II.8:

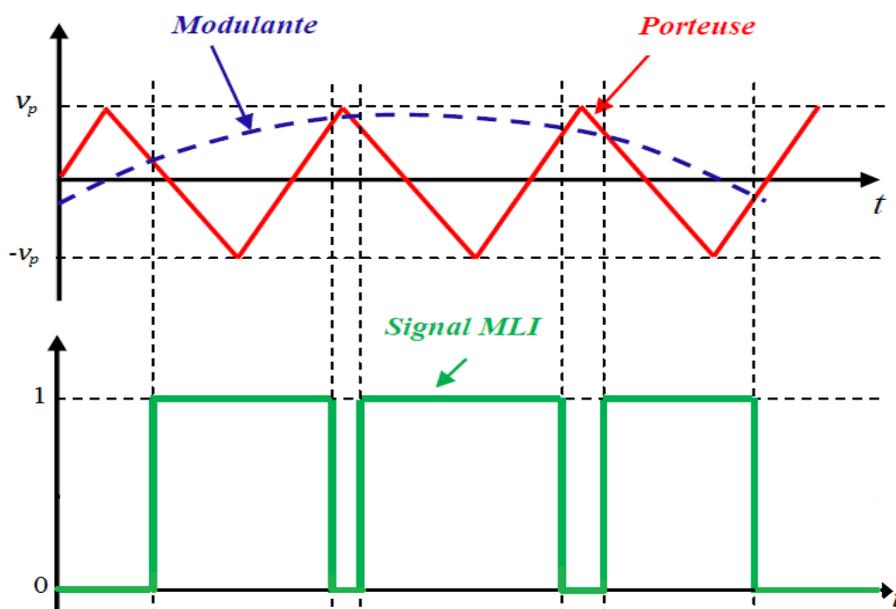


Figure II.8 : Principe de la commande MLI sinus-triangle

II.3.5 Modélisation du bus continu

Le bus continu est un élément de stockage d'énergie, représenté par une capacité qui sert de source tampon d'énergie entre les deux convertisseurs côté machine et le convertisseur côté charge. Chaque convertisseur exerce son influence sur ce circuit, par le courant qu'il absorbe ou qu'il fournit au condensateur [Abd 18].

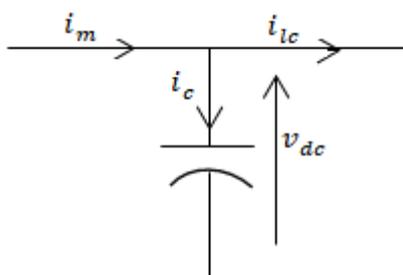


Figure II.9 : Représentation du circuit du bus continu

La tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif, son expression est donnée par l'équation (II.29) [Aou 17] :

$$v_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int i_c dt \quad (\text{II.29})$$

II.3.6 Modélisation de la charge

Pour la charge résistive, la valeur du courant est directement proportionnelle à la tension. La caractéristique principale de ce type de charge est de ne pas présenter d'harmoniques.

II.4 Résultats de simulation

La simulation de la turbine et de la GADA est réalisée sur le logiciel MATLAB/Simulink, leurs paramètres sont donnés dans l'annexe (A).

I.4.1 Résultats de simulation de la turbine

Nous présentons la simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne.

Nous n'allons pas raccorder la turbine et son multiplicateur à la génératrice. Nous observons donc l'allure du vent, la puissance aérodynamique de la turbine, le couple aérodynamique ainsi que la vitesse de l'arbre rapide et cela pour deux valeurs du couple électromagnétique.

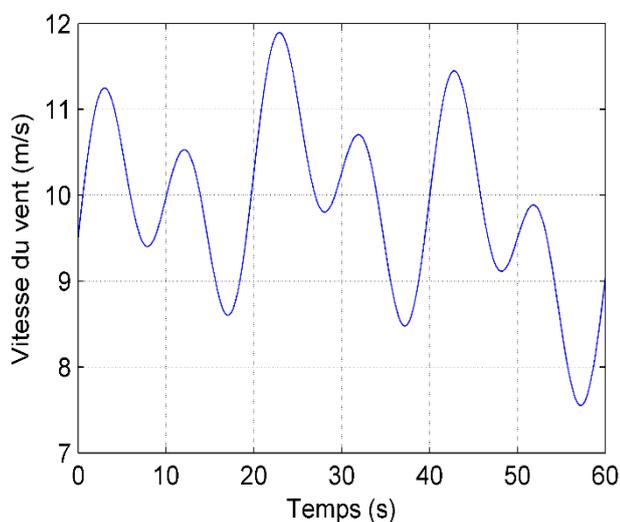


Figure II.10 : Variation de l'allure du vent

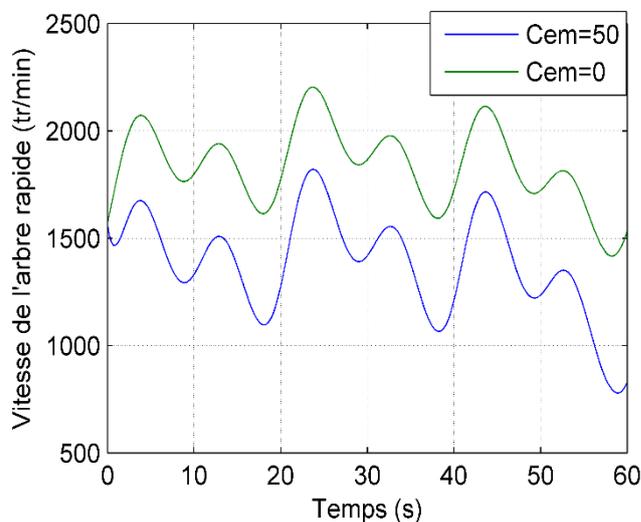


Figure II.11 : Variation de la vitesse de l'arbre rapide

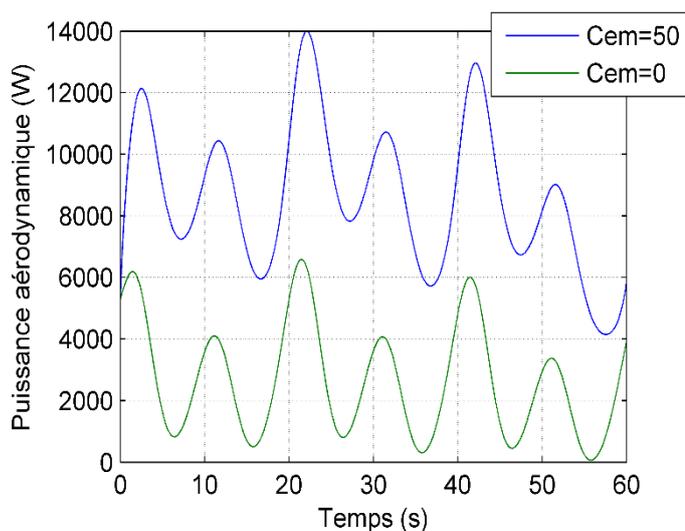


Figure II.12 : Variation de la puissance aérodynamique

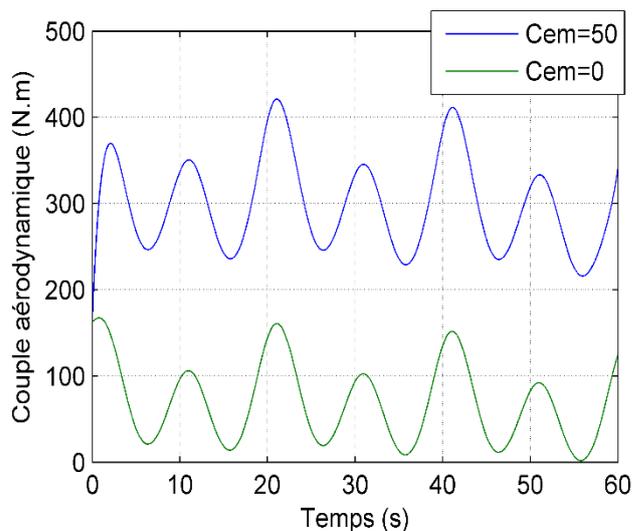


Figure II.13 : Variation du couple aérodynamique de la turbine

Interprétation des résultats

Dans la figure II.11 on constate que la vitesse de l'arbre rapide suit la même forme que l'allure du vent et pour une valeur du couple électromagnétique plus grande, la vitesse de l'arbre rapide diminue.

On remarque dans les figures II.12 et II.13 que la puissance aérodynamique ainsi que le couple aérodynamique respectivement atteignent des valeurs plus grandes en augmentant la valeur du couple électromagnétique, aussi, on remarque que les allures de la puissance et du couple suivent la forme de l'allure du vent.

I.4.2 Résultats de simulation de la GADA

La génératrice est simulée sans et avec convertisseur statique (Figure II.14 et II.15 respectivement) pour trois modes de fonctionnement (hypo synchrone ($g > 0$) (0 à 1s), hyper synchrone ($g < 0$) (1 à 2s), et synchrone ($g = 0$) (2 à 3s). On a fait varier la tension rotorique de telle sorte que pour les trois modes de fonctionnement (différentes vitesses de rotation), on obtient une tension de charge fixe (220V/50Hz).

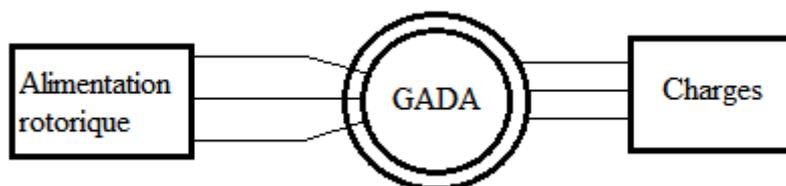


Figure II.14 : Schéma de simulation de la GADA sans convertisseur statique

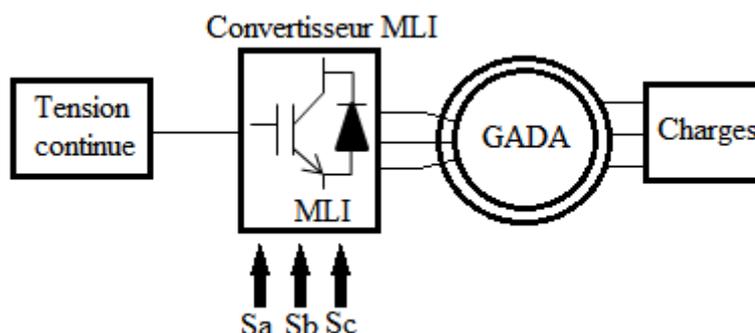


Figure II.15 : Schéma de simulation de la GADA avec convertisseur statique

Les résultats de la simulation sans convertisseur statique sont donnés sur les figures II.16-II.21.

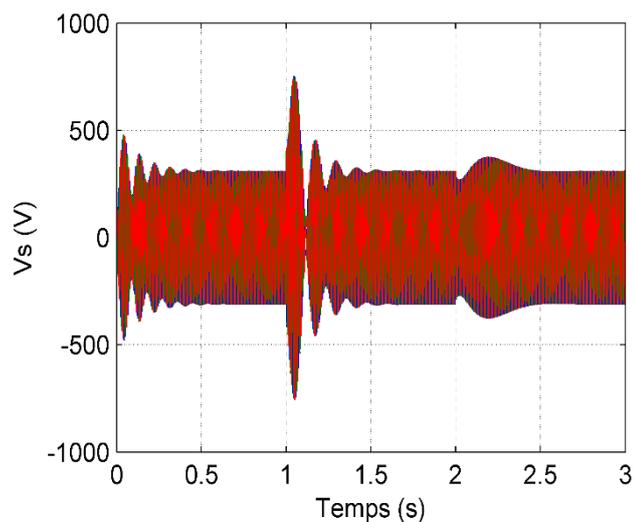


Figure II.16 : Tensions des phases statoriques

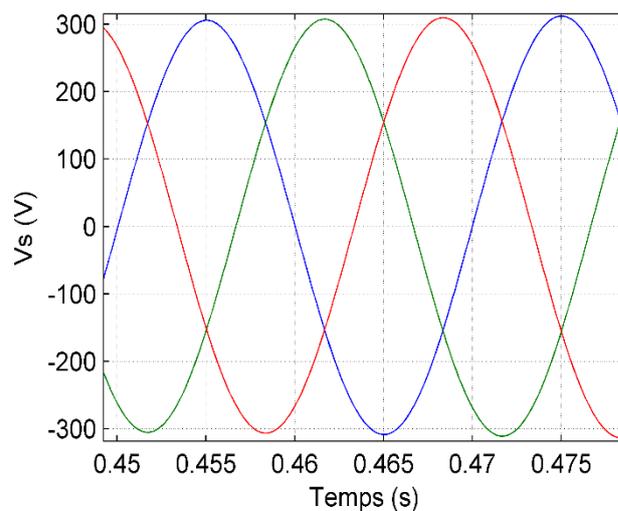


Figure II.17 : Tensions des phases statoriques avec zoom sur l'image

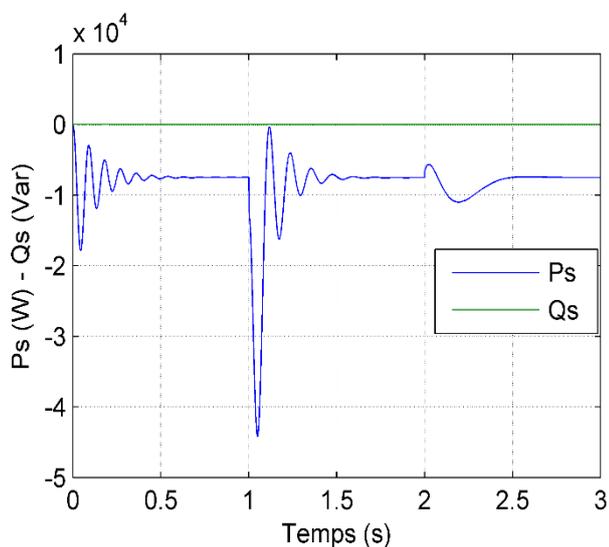


Figure II.18 : Variation des puissances active et réactive statoriques

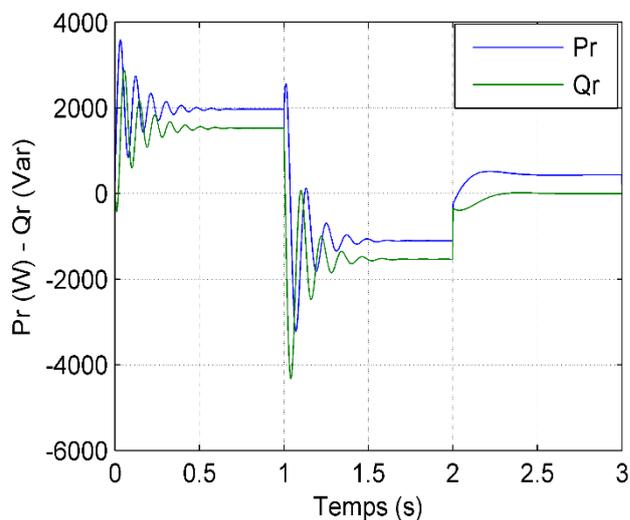


Figure II.19 : Variation des puissances active et réactive rotoriques

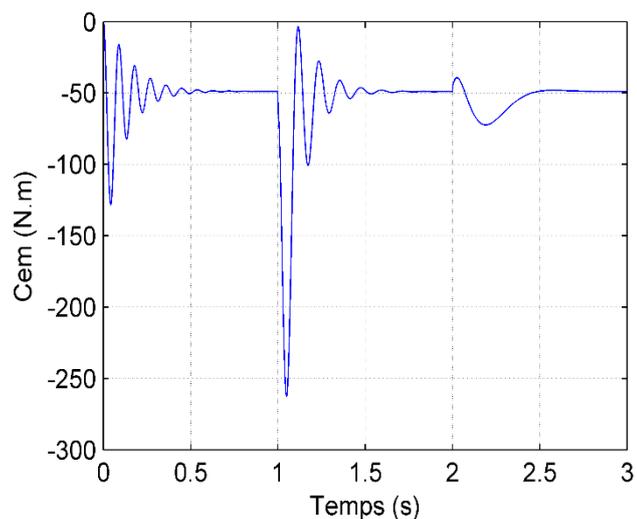


Figure II.20: Variation du couple électromagnétique

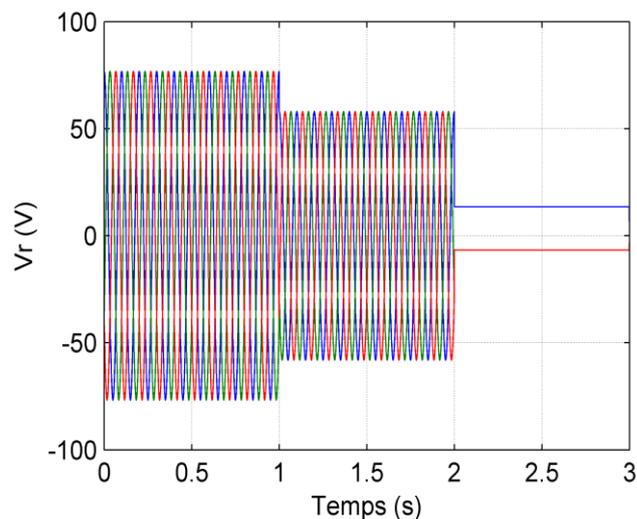


Figure II.21 : Tensions des phases rotoriques

Les résultats de la simulation avec convertisseur statique sont donnés sur les figures II.22-II.27.

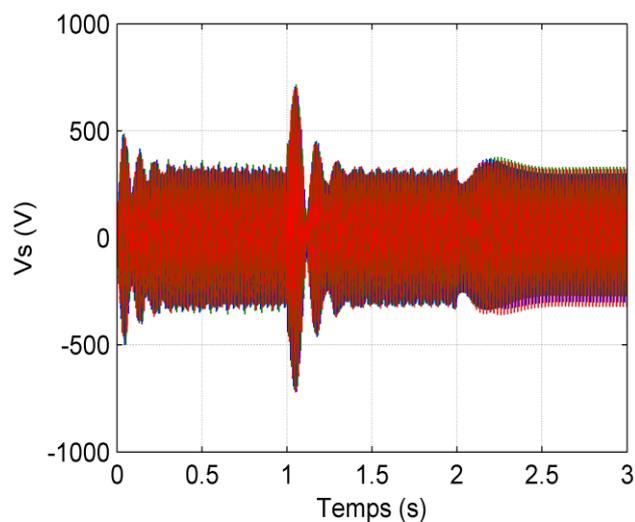


Figure II.22: Tensions des phases statoriques

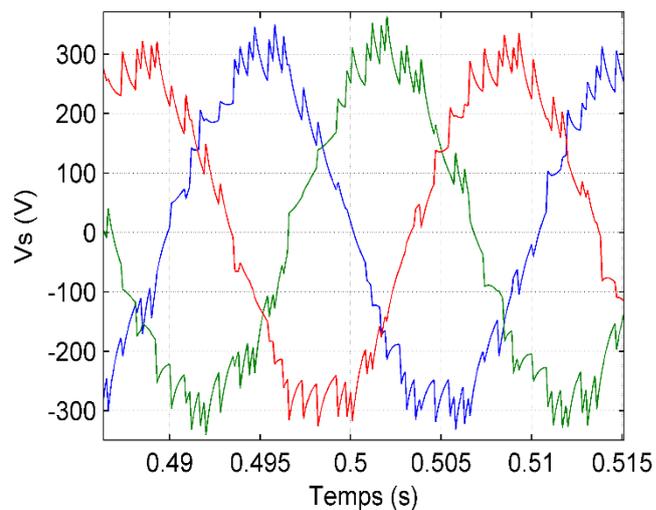


Figure II.23: Tensions des phases statoriques avec zoom sur l'image

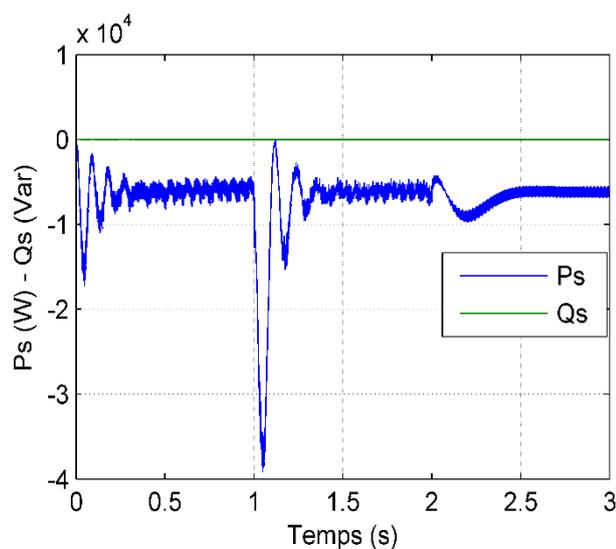


Figure II.24 : Variation des puissances active et réactive statoriques

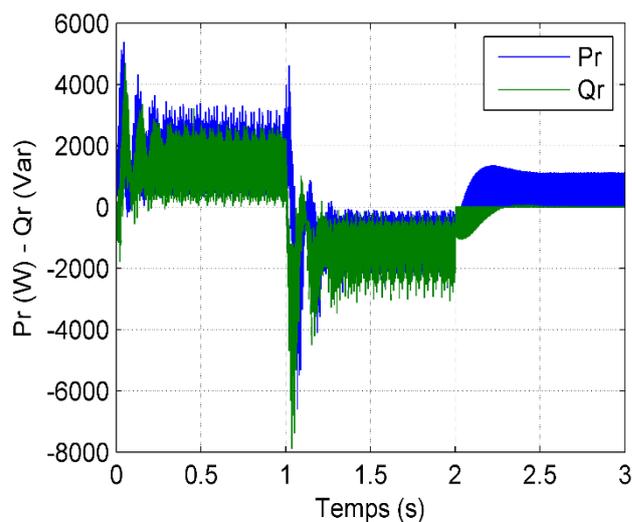


Figure II.25 : Variation des puissances active et réactive rotoriques

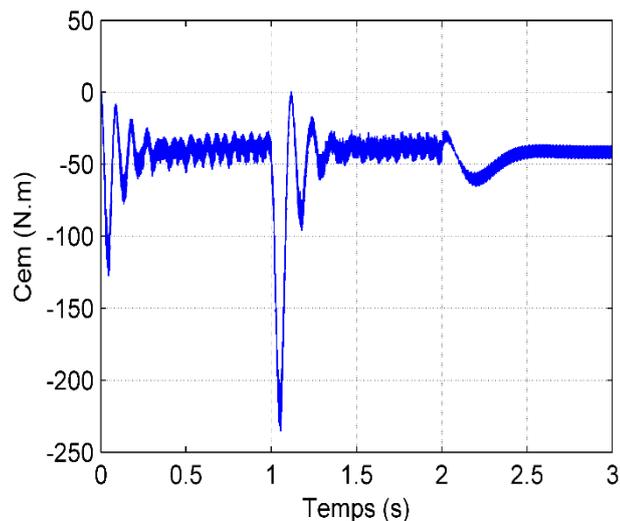


Figure II.26 : Variation du couple électromagnétique

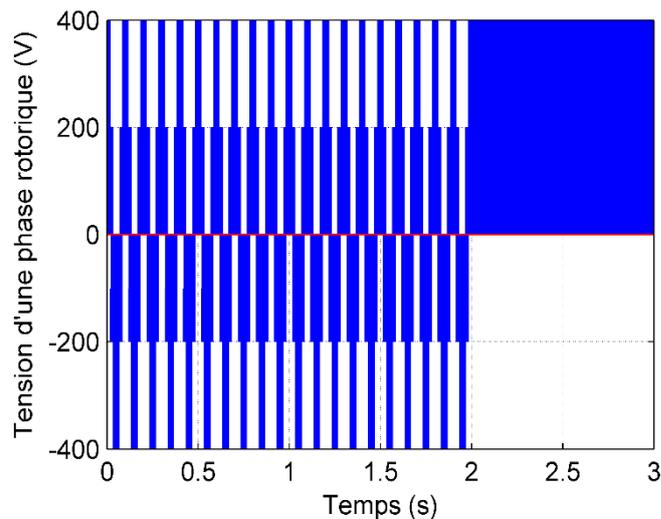


Figure II.27 : Tension d'une phase rotorique

Interprétation des résultats

Les résultats de simulation donnés dans les figures II.16-II.27 représentent l'évolution de quelques grandeurs physiques de la machine à savoir les tensions statoriques et rotoriques, le couple électromagnétique, les puissances active et réactive en présence et en absence du convertisseur statique pour les trois modes de fonctionnement de la GADA.

On constate d'importantes oscillations des grandeurs visualisées au début de chaque mode de fonctionnement, cela s'explique par l'absence de la commande de la GADA.

Les résultats obtenus en simulation avec convertisseur statique montrent plus des fluctuations au niveau des puissances, de la tension statorique et du couple électromagnétique de la machine dues à la technique MLI à cause de la commutation des interrupteurs.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a décrit puis présenté la modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation. Enfin, nous avons simulé la turbine et la GADA pour ses différents modes de fonctionnement.

Comme nous avons pu le voir dans les résultats de simulation, la machine asynchrone à double alimentation pose de sérieux problèmes de stabilité en boucle ouverte, dans ce cas, le recours aux commandes bouclées, et spécialement les commandes de type vectoriel devient indispensable.

Ainsi, la commande vectorielle de la GADA et la simulation du système global feront l'objet des prochains chapitres.

Chapitre III

Commande vectorielle de la GADA et contrôle de la tension générée

III.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude de la commande de la MADA en tant que génératrice en fonctionnement autonome dans un système éolien. Dans notre étude, la MADA est totalement interfacée. Le rotor et le stator sont alimentés par deux convertisseurs de tension indépendants reliés à un même bus de tension continu.

Sachant que le convertisseur coté charge devra générer les tensions triphasées, alimentant la charge, à des amplitudes et fréquences fixes, la grandeur la plus importante à contrôler sera la tension continue à la sortie des deux convertisseurs coté machine.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons au contrôle de cette tension afin de la maintenir constante pour des variations de la charge et de la vitesse dans une certaine plage de faisabilité. Pour assurer ce contrôle, nous avons choisi d'utiliser la commande vectorielle avec orientation de flux statorique.

Ensuite, nous nous intéresserons au contrôle de la tension de charge en termes d'amplitude et de fréquence. Ce contrôle sera possible par la commande MLI du convertisseur coté charge.

Enfin, nous donnerons la technique choisie pour l'excitation initiale de la MADA.

III.2 Commande vectorielle

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leurs comportements statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée, il s'agit donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple) [Idj 10]. La figure III.1 illustre le principe de la commande vectorielle.

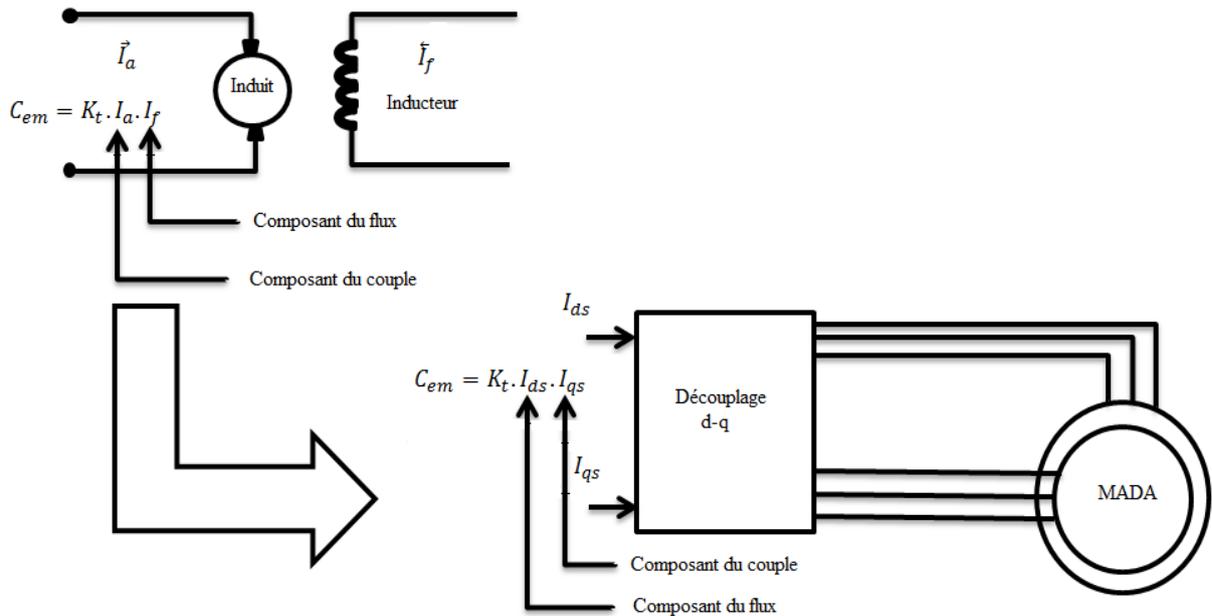


Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle

L'objectif par la commande d'un système éolienne diffère selon le type d'utilisation. Dans le cas d'un raccordement au réseau, le système éolien doit fournir la puissance active requise tout en minimisant la puissance réactive absorbée, et ce quelle que soit la vitesse du vent, sous réserve qu'elle soit suffisante pour produire de l'énergie électrique alors que dans le cas d'un fonctionnement autonome, le système éolienne doit générer un système triphasé de tension de valeur efficace et de fréquence fixes quelles que soient la vitesse du vent et/ou la charge connectée, sous réserve que la puissance du vent soit suffisante. Notre travail est basé sur le deuxième cas.

L'objectif de la commande est alors de maintenir constante la tension continue en sortie des deux convertisseurs coté machine. Cela peut être obtenu par le contrôle du flux et de la puissance transmise par la machine, c'est-à-dire son couple électromagnétique (en fonction de la vitesse).

III.2.1 Méthodes de la commande vectorielle

Il existe deux approches possibles :

- La méthode directe (en anglais : **D**irect **F**ield **O**riented **C**ontrol ou **DFOC**).
- La méthode indirecte (en anglais : **I**ndirect **F**ield **O**riented **C**ontrol ou **IFOC**).

III.2.1.1 Commande vectorielle directe (CVD)

Cette méthode est suggérée par Blaschke et présentée au public à 1970 elle est basée sur la position du flux à orienter est mesurée électriquement en utilisant un capteur physique de flux installé dans le bobinage statorique et de mesurer directement les composantes du flux, ou un modèle dynamique de flux, est requise pour assurer le découplage entre le couple et le flux. En effet, la position du flux rotorique est calculée algébriquement à partir de l'information sur le flux rotorique [Ben 10].

III.2.1.2 Commande vectorielle indirecte (CVI)

La méthode indirecte a été introduite par K. Hasse. Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude de flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux, et régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, mais l'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité aux variations paramétriques de la machine due à la saturation magnétique et à la variation de température. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [Abdr 17].

III.2.2 Orientation du flux

Dans le chapitre II, nous avons établi les équations de la machine dans le repère (dq) lié au champ tournant. Ce choix facilite la réalisation du découplage entre le flux et le couple, pour réaliser ce découplage, il faut orienter le repère (dq), c'est-à-dire fixer en permanence une contrainte telle que l'une des grandeurs de sortie intervenant dans l'expression du couple soit imposée.

Il existe trois types d'orientation du flux [Aou 17] :

- Orientation du flux statorique avec les conditions : $\phi_{sq} = 0 \Leftrightarrow \phi_{sd} = \phi_s$ (III.1)

- Orientation du flux rotorique avec les conditions : $\phi_{rq} = 0 \Leftrightarrow \phi_{rd} = \phi_r$ (III.2)

- Orientation du flux d'entrefer avec les conditions : $\phi_{gq} = 0 \Leftrightarrow \phi_{gd} = \phi_g$ (III.3)

Avec : ϕ_{gq} : Flux d'entrefer d'axe quadratique ; ϕ_{gd} : Flux d'entrefer d'axe direct; ϕ_g : Flux d'entrefer nominal.

Dans notre étude, nous utiliserons la commande vectorielle à flux statorique orienté. L'avantage de cette stratégie réside dans le fait que le système est peu sensible à la variation des inductances de la machine. En revanche, elle dépend de la variation de la résistance statorique. A basse tension, cette dernière tend à réduire la précision de l'estimation du flux [Idj 10].

Le référentiel diphasé (dq) lié au champ tournant statorique est donné dans la figure III.2 :

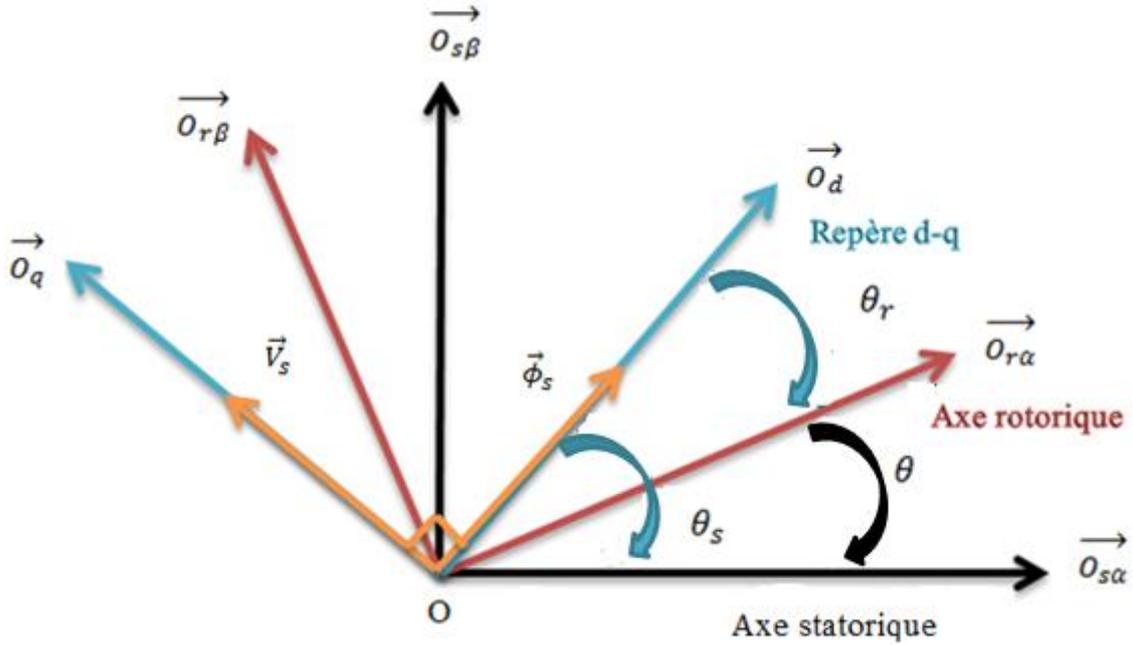


Figure III.2 : Référentiel diphasé (dq) lié au champ tournant statorique

III.2.2.1 Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique

On applique la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la GADA étudié dans le chapitre II (équations II.20 et II.21) en orientant le repère de Park pour que le flux ϕ_s soit aligné en permanence avec l'axe d , sa composante quadratique est donc nulle et la commande est telle que le flux ϕ_s est maintenu constant. On obtient les deux systèmes d'équations suivant :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \omega_s \cdot \phi_s \\ v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rq} \\ v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (III.4)$$

$$\begin{cases} \phi_s = L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd} \\ 0 = L_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + L_m \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + L_m \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (III.5)$$

L'orientation de notre repère impose une relation de proportionnalité entre les courants de commande d'axes en quadrature, l'équation suivante est obtenue à partir du système d'équations III.5:

$$i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} \cdot i_{rq} \quad (\text{III.6})$$

Cette simplification conduit à une expression du couple électromagnétique semblable à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée où un découplage entre le flux et le couple électromagnétique est naturel [Abd 11]. Le repère orienté impose $\phi_{sq} = 0$, et en connaissant le courant i_{sq} , l'expression de couple électromagnétique donné par la relation II. 23 devient :

$$C_{em} = p \cdot \phi_{sd} \cdot i_{sq} \quad (\text{III.7})$$

En négligeant la résistance statorique, on peut avoir le flux statorique ϕ_s en fonction de la pulsation statorique ω_s et de la tension V_s :

$$\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{III.8})$$

Avec : $V_s = v_{sq}$.

Le flux statorique de référence est choisi afin de placer la machine dans un état de magnétisation proche à celui de son point de fonctionnement nominale [Idj 10]. Dans notre cas, la référence de flux statorique est égale au ratio de la tension nominale et de la pulsation statorique :

$$\phi_s^* = \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{314} \approx 1,2 \text{ Wb} \quad (\text{III.9})$$

On contrôle et on maintient constant le flux $\phi_{sd} = \phi_s$ à la sortie de la génératrice, le contrôle du flux nous donne le courant total de l'excitation.

Afin de pouvoir répartir les pulsations et les puissances en égalité entre le stator et le rotor, on divise le courant d'excitation total en égalité. Ainsi, on obtient les courants de commande d'axe direct :

$$i_{sd} = i_{rd} \quad (\text{III.10})$$

La figure III.3 illustre la représentation vectorielle de l'ensemble des grandeurs caractéristiques de la machine ainsi que le découplage entre le flux et le couple.

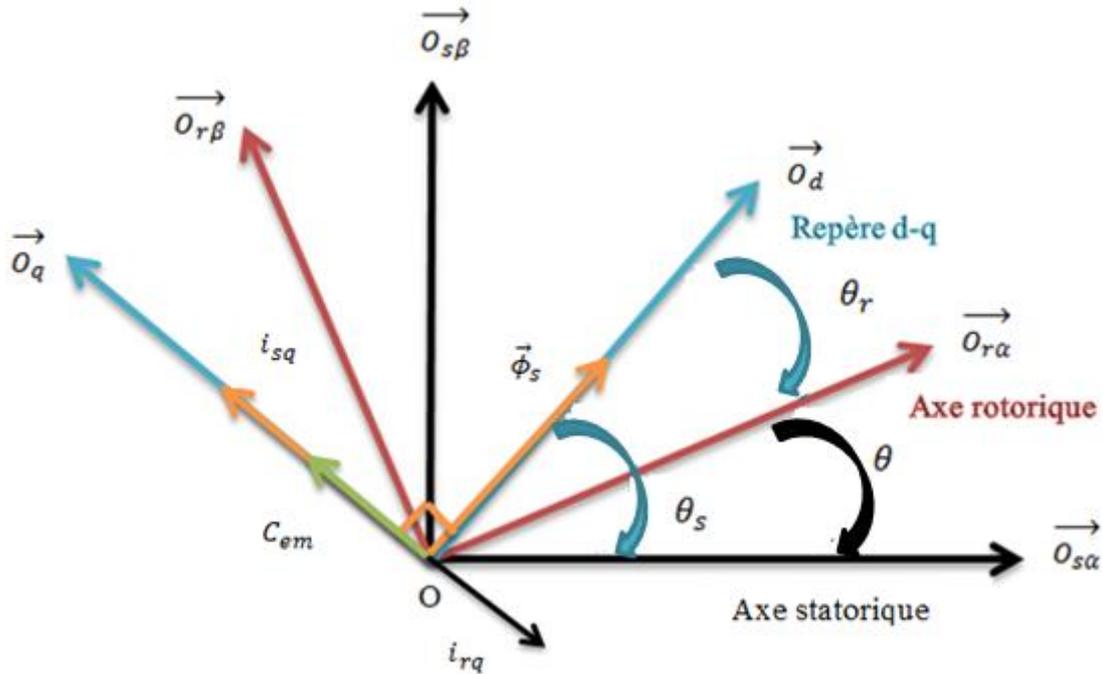


Figure III.3 : Orientation du flux statorique

III.2.2.2 Définition de l'algorithme de commande

D'après le système d'équations III.5, le flux statorique ϕ_s peut être contrôlé par le courant d'axe direct. Une fois celui-ci maintenue à sa référence, le couple est alors directement proportionnel au courant i_{sq} (équation III.7).

Dans notre cas, c'est la tension v_{dc} à la sortie des deux convertisseurs coté machine qui doit être contrôlée et maintenue constante. Partant de la tension v_{dc} à contrôler et du courant i_c^* mesuré à la sortie du régulateur de tension, on peut exprimer la puissance débitée sur la charge comme suit :

$$P^* = v_{dc}^* \cdot i_c^* \quad (\text{III.11})$$

En négligeant les pertes, on peut confondre la puissance P^* avec la puissance électromagnétique dont l'expression est :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega_{méc} \quad (\text{III.12})$$

On peut alors exprimer le couple électromagnétique comme suit :

$$C_{em} = \frac{P^*}{\Omega_{méc}} \quad (\text{III.13})$$

De ce fait, le contrôle de v_{dc} peut se faire par l'intermédiaire du couple électromagnétique.

III.2.2.3 Contrôle des courants et termes de compensation

La configuration du système qu'on a étudié est basé sur une machine commandée par le stator et le rotor, et ces dernières sont alimentés par deux convertisseurs indépendants, avec cette solution il est possible de répartir la puissance électrique fournie entre le stator et le rotor. Le couple et le flux de la machine sont contrôlés par l'intermédiaire de quatre boucles de courant.

Dans le but d'obtenir un bon découplage entre les grandeurs suivant les axes d et q , on définit de nouvelles tensions transformées, tel que :

$$\begin{cases} v'_{sd} = v_{sd} - \frac{L_m}{L_r} \cdot v_{rd} \\ v'_{sq} = v_{sq} - \frac{L_m}{L_r} \cdot v_{rq} \\ v'_{rd} = v_{rd} - \frac{L_m}{L_s} \cdot v_{sd} \\ v'_{rq} = v_{rq} - \frac{L_m}{L_s} \cdot v_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

En se basant sur le modèle dynamique de la machine dans le repère tournant à la vitesse du champ tournant statorique, les expressions des tensions du stator et du rotor s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{sd} = (R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s) \cdot i_{sd} - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{rd} - \omega_s \cdot \phi_{sq} + (\omega_s - \omega) \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_{rq} + \frac{L_m}{L_r} \cdot v_{rd} \\ v_{sq} = (R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s) \cdot i_{sq} - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{rq} + \omega_s \cdot \phi_{sd} - (\omega_s - \omega) \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_{rd} + \frac{L_m}{L_r} \cdot v_{rq} \\ v_{rd} = (R_r + \sigma \cdot L_r \cdot s) \cdot i_{rd} - R_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{sd} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rq} + \omega_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \phi_{sq} + \frac{L_m}{L_s} \cdot v_{sd} \\ v_{rq} = (R_r + \sigma \cdot L_r \cdot s) \cdot i_{rq} - R_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{sq} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rd} - \omega_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \phi_{sd} + \frac{L_m}{L_s} \cdot v_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Avec : $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}$: Coefficient de dispersion ; s : Opérateur de Laplace.

A partir des systèmes d'équations III.14 et III.15, on peut avoir des relations directes entre les tensions intermédiaires et les courants statoriques et rotoriques dans les deux axes comme suit :

$$\begin{cases} v'_{sd} = (R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s) \cdot i_{sd} - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{rd} - \omega_s \cdot \phi_{sq} + \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_{rq} \\ v'_{sq} = (R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s) \cdot i_{sq} - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{rq} + \omega_s \cdot \phi_{sd} - \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_{rd} \\ v'_{rd} = (R_r + \sigma \cdot L_r \cdot s) \cdot i_{rd} - R_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{sd} - \omega_r \cdot \phi_{rq} + \omega_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \phi_{sq} \\ v'_{rq} = (R_r + \sigma \cdot L_r \cdot s) \cdot i_{rq} - R_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{sq} + \omega_r \cdot \phi_{rd} - \omega_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Soit :

$$\begin{cases} v'_{sd} = (R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s) \cdot i_{sd} + p_1 \\ v'_{sq} = (R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s) \cdot i_{sq} + p_2 \\ v'_{rd} = (R_r + \sigma \cdot L_r \cdot s) \cdot i_{rd} + p_3 \\ v'_{rq} = (R_r + \sigma \cdot L_r \cdot s) \cdot i_{rq} + p_4 \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Où : p_1, p_2, p_3, p_4 sont considérés comme des termes de compensation. Ces termes sont associés à chaque axe de chaque côté de la machine. Des fonctions de transfert peuvent être définies entre les courants et les tensions d'un même axe au stator ainsi qu'au rotor, comme le montre le système d'équations III.18.

$$\begin{cases} F^s(s) = \frac{1}{R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s} \\ F^r(s) = \frac{1}{R_r + \sigma \cdot L_r \cdot s} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Le schéma de régulation associé à chacun des quatre courants est donné par la figure III.4. Dans cette figure, des régulateurs de type PI sont utilisés pour pouvoir imposer les quatre courants à leurs références.

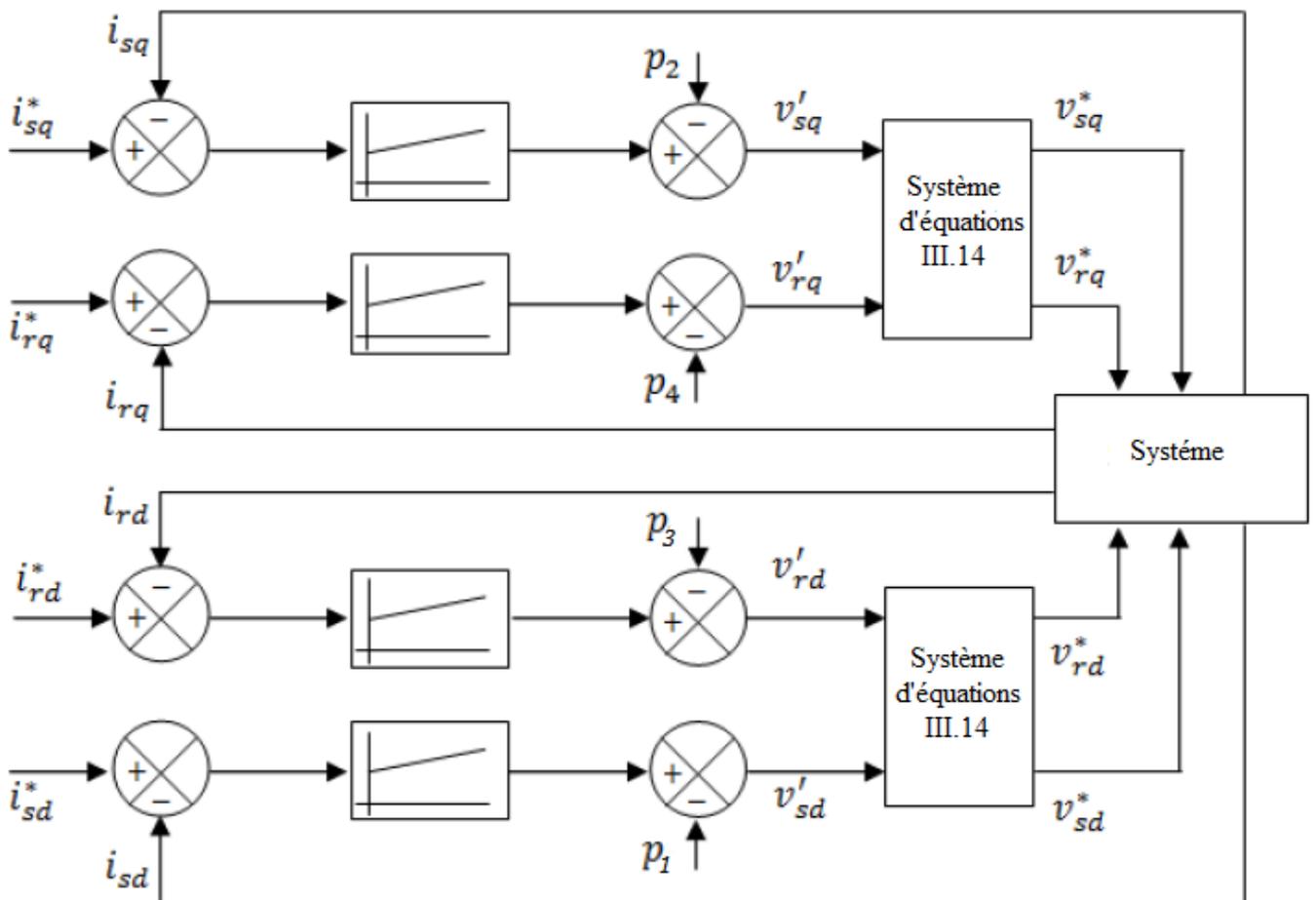


Figure III.4 : Boucles de régulation des courants du stator et du rotor

Ce schéma montre l'indépendance qui existe entre les deux axes de commande et mis en évidence le couplage du côté de la machine, stator et rotor, sur un même axe par le biais des tensions intermédiaires croisées.

L'ensemble de la chaîne de régulation nous conduit au schéma de commande global développé sur la figure III.5.

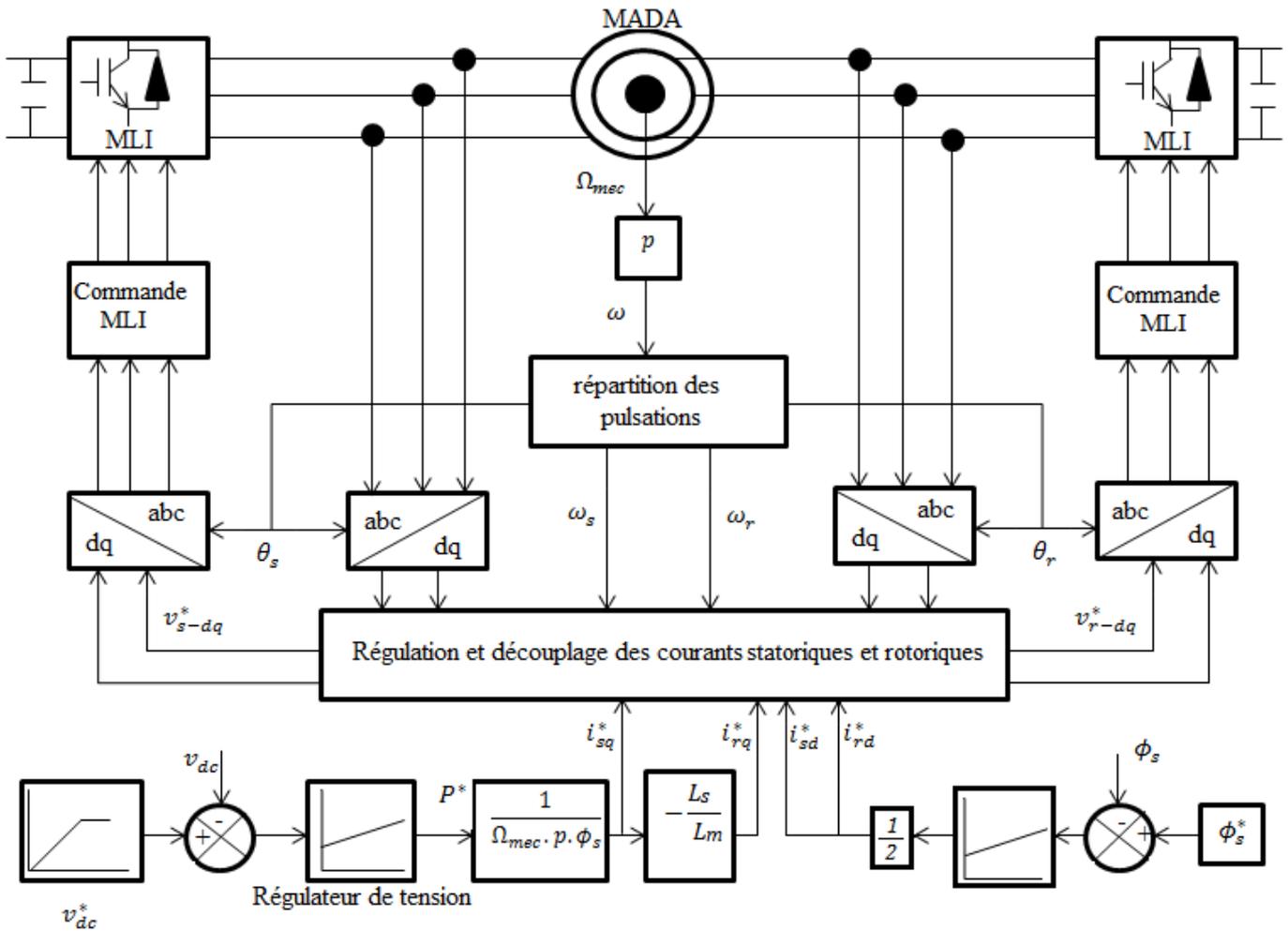


Figure III.5 : Schéma de commande d'une MADA totalement interfacée

III.3 Contrôle de la tension de sortie en termes d'amplitude et de fréquence

L'amplitude et la fréquence de la tension délivrée par une génératrice asynchrone est sensible aux variations de la charge et de la vitesse. Pour fixer cette tension, une commande vectorielle par orientation de flux statorique est proposée dans la première partie de ce chapitre. Celle-ci, permet le contrôle de la tension de sortie via des convertisseurs statiques (figure II.1), indépendamment de ces variations de la charge et de la vitesse.

La commande du convertisseur MLI coté charge (figure III.6) permet d'imposer la référence de tension PCC en termes d'amplitude et de fréquence. La tension de sortie est régulée indirectement en contrôlant la tension du circuit intermédiaire v_{dc} et l'amplitude du flux statorique dans la machine à ses valeurs de référence et en maintenant l'indice de modulation de l'onduleur dans une limite raisonnablement pratique.

En ce qui concerne la fréquence de la tension PCC, elle peut être maintenue à une valeur spécifiée en choisissant la fréquence du signal de référence sinusoïdal tout en générant les impulsions du convertisseur.

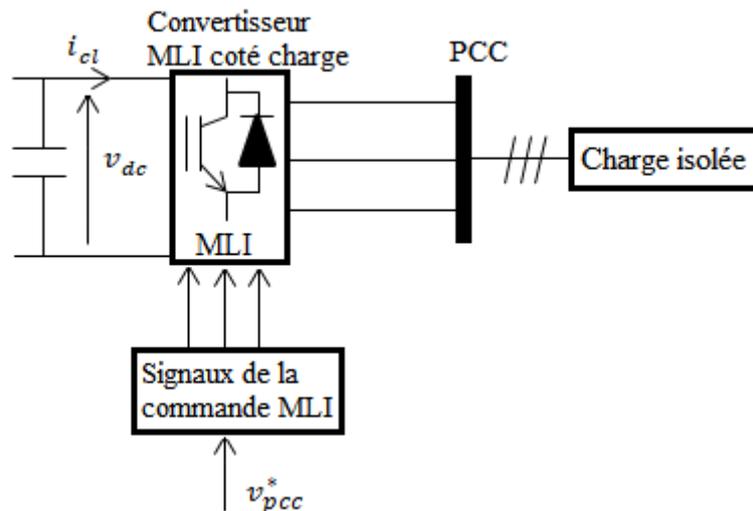


Figure III.6 : Commande MLI du convertisseur coté charge

La commande du convertisseur coté charge est réalisée à base de la MLI sinus-triangle. Cette technique de commande est donnée dans le chapitre II.

III.4 Amorçage de la MADA sans source extérieure

Comme déjà indiqué précédemment (Chapitre I), cette technique évite l'utilisation de tout support matériel supplémentaire connecté soit au rotor soit au stator, ce qui rend le système plus léger et moins coûteux. Le processus d'excitation de la machine est déclenché à partir d'une petite quantité d'énergie initiale provenant de la tension générée par le magnétisme rémanent de la machine. Au fur et à mesure que la machine tourne, la commande des convertisseurs est maintenue hors circuit et la tension produite par le magnétisme rémanent est redressée par les diodes antiparallèles des convertisseurs électroniques, et charge ainsi le condensateur de liaison continue à un certain niveau de tension. Dans le cas où le magnétisme rémanent n'est pas suffisant pour démarrer le processus d'établissement de tension, une source externe de faible tension sera nécessaire pour la charge préliminaire du condensateur.

Ensuite, le processus d'auto-excitation de la machine peut être démarré en introduisant les contrôleurs des convertisseurs en action. Ainsi, un courant provenant du condensateur initialement chargé est injecté dans le

rotor et le stator à travers les convertisseurs côté rotor et stator respectivement, fournissant ainsi les ampères-tours magnétisant nécessaires pour établir le flux dans la machine. Au fur et à mesure que la tension du stator et du rotor commence à s'établir, la tension du bus continue d'augmenter aussi en chargeant le condensateur à travers les convertisseurs côté stator et rotor.

Les courants qui circulent dans les enroulements dissipent une certaine quantité d'énergie dans les résistances du circuit. Une source d'énergie est donc nécessaire pour compenser ces pertes. Dans un premier temps, au moment de démarrage, en raison du faible flux dans la machine la conversion d'énergie reste à faible valeur, en même temps, les pertes résistives sont élevées en raison des transitoires de courants élevés, par conséquent, les pertes totales de la machine sont supérieures à la puissance convertie, cela est donc compensé par la présence d'une énergie initiale suffisante dans le condensateur.

Dans un second temps, en raison de l'augmentation continue du flux, la génération de la puissance augmente et puisque les courants du stator et du rotor décidés par les régulateurs de tension restent à des valeurs faibles, les pertes d'énergie deviennent alors inférieures. Par conséquent, la puissance générée dépasse les pertes totales du circuit, ce qui fait qu'une énergie est stockée dans le condensateur du bus continu et l'amorçage du générateur est déclenché comme montré sur la figure III.7.

Enfin, Une fois la tension de référence soit atteinte, les deux convertisseurs sont contrôlés de telle sorte que la génération de puissance et les pertes totales de puissance soit identiques.

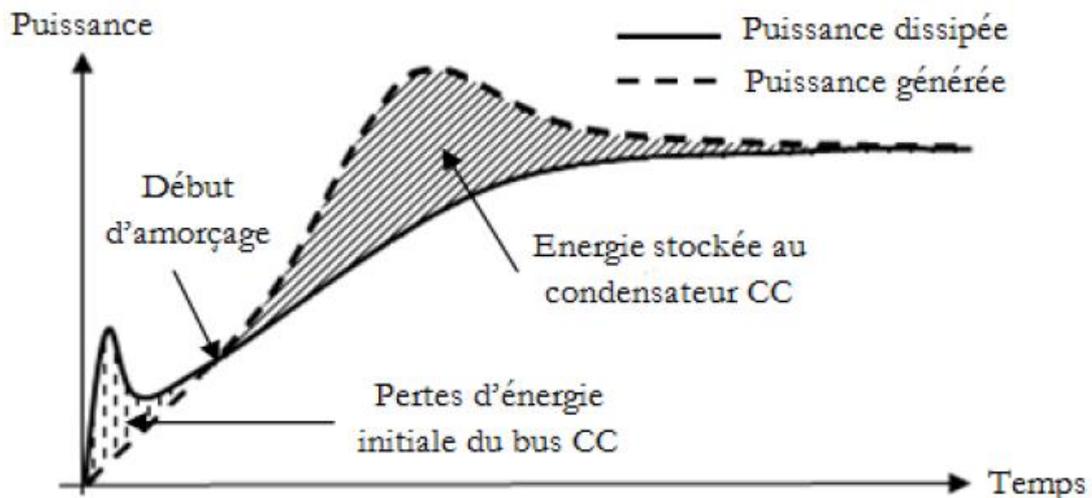


Figure III.7 : Diagramme d'énergie correspondant au processus d'amorçage

Pour le succès du processus d'excitation, la réduction des pertes d'énergies dans le circuit est nécessaire. Cela peut être obtenu en utilisant une rampe de référence approprié qui permet de contrôler les courants de la machine à faibles valeurs et minimiser ainsi les pertes d'énergies lors du démarrage de l'excitation. En l'absence de cette rampe les courants des armatures seraient élevés au démarrage de l'excitation et la

machine continue à absorber de l'énergie du bus continu pouvant provoquer ainsi un effondrement total de la tension [Abd 18].

III.5 Conclusion

Ce troisième chapitre a été consacré à la commande vectorielle de la génératrice asynchrone double alimentée débitant sur deux convertisseurs afin de maintenir la tension du bus continu constante pour des variations de vitesse et/ou de charge.

Une fois la tension continue contrôlée à sa valeur de référence, il est alors aisé d'utiliser un convertisseur coté charge qui puisse alimenter des charges autonomes avec des tensions d'amplitude et de fréquence fixe.

Dans le chapitre qui suit, nous simulerons sous l'environnement MATLAB/Simulink le système global de la figure II.1 en faisant varier la charge et/ou la vitesse.

Chapitre IV

Résultats de simulation et interprétations du système autonome étudié

IV.1 Introduction

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé les différentes parties du système autonome de la figure II.1, ensuite, dans le troisième chapitre, nous avons présenté une commande vectorielle qui permet de maintenir la tension du bus continu constante pour des variations de charge et/ou de vitesse.

Dans ce dernier chapitre, nous simulerons sous l'environnement MATLAB/Simulink le système global pour montrer l'influence de ces variations sur les grandeurs de celui-ci ainsi que la fiabilité de la commande utilisée.

IV.2 Simulation du système global à base d'une MADA totalement interfacée

Les différents paramètres du système autonome étudié sont donnés dans l'annexe (A). Ce système alimente une charge triphasée équilibrée.

Le schéma global de la commande du système étudié est représenté dans la figure IV.1.

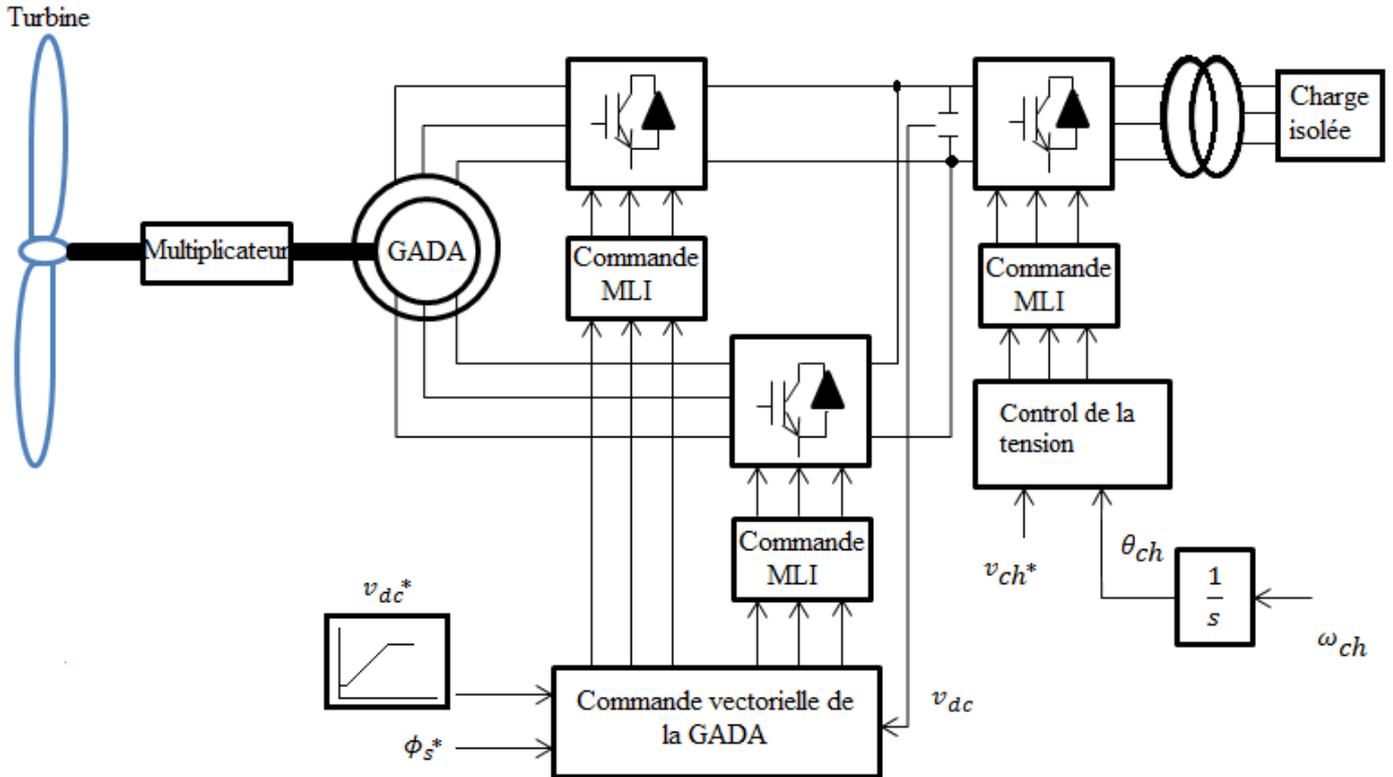


Figure IV.1 : Schéma global à base d'une GADA en fonctionnement autonome à contrôler

La vérification du bon fonctionnement de la commande vectorielle étudié sur une charge équilibrée est effectuée par le biais des tests suivants :

- Auto-amorçage ;
- Impact de la variation de la charge ;
- Impact de la variation de la vitesse.

IV.2.1 Auto amorçage

Dans ce test, le processus d'établissement de la tension du système de génération étudié est simulé. On considère une MADA qui tourne à une vitesse de rotation constante 1300 tr/mn avec le disjoncteur de charge en état ouvert. Afin d'initier le processus d'excitation de la machine, on suppose que le condensateur (90 μ F) du bus continu est pré-chargé à une faible tension de 12 Volts via le magnétisme rémanent de la machine comme cela est expliqué dans le troisième chapitre.

Résultats de simulation et interprétation

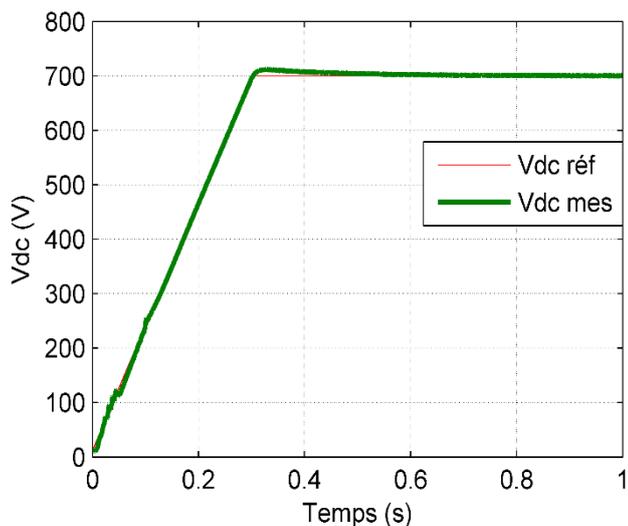


Figure IV.2 : Allures de la tension du bus continu et sa référence

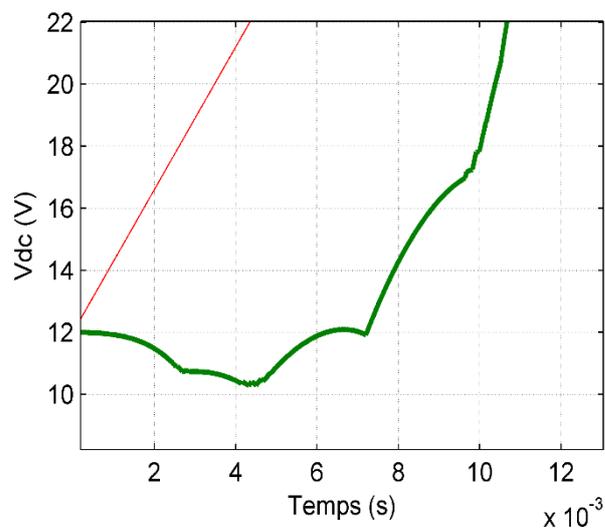


Figure IV.3 : Zoom sur la tension du bus continu et sa référence

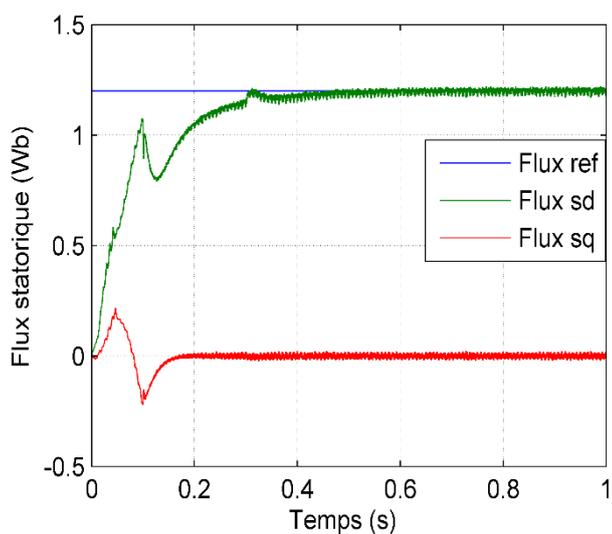


Figure IV.4 : Composantes directe et quadratique du flux statorique

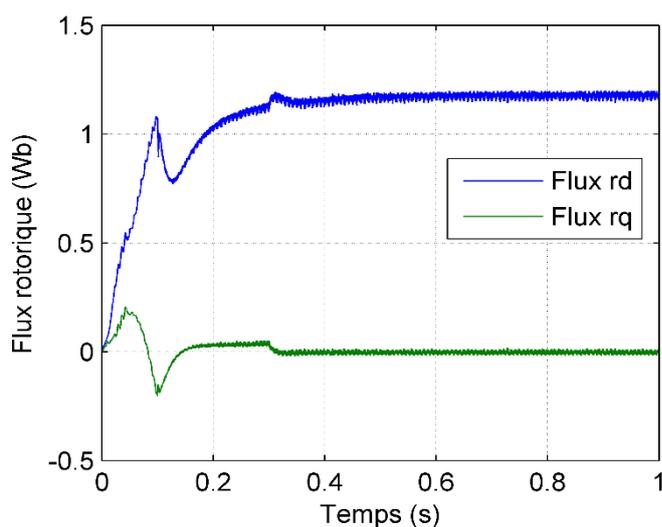


Figure IV.5 : Composantes directe et quadratique du flux rotorique

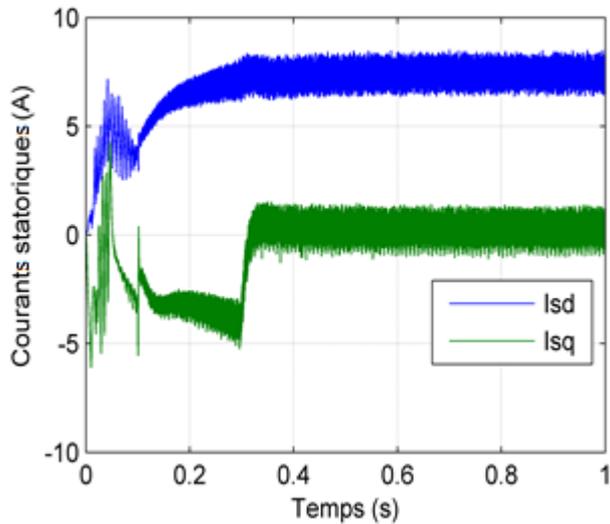


Figure IV.6 : Composantes directe et quadratique des courants statoriques

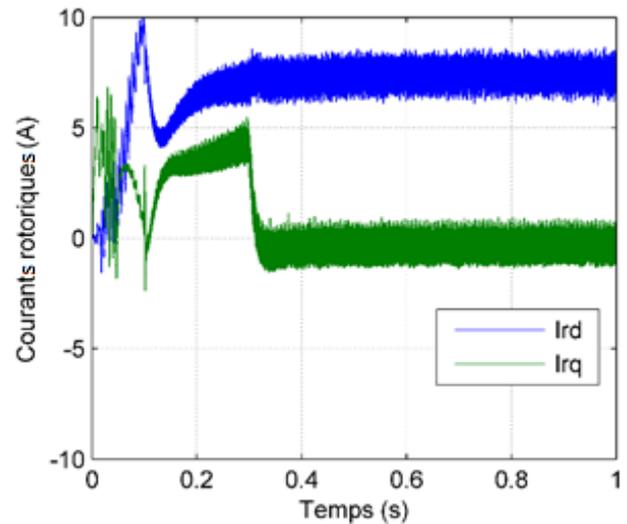


Figure IV.7 : Composantes directe et quadratique des courants rotoriques

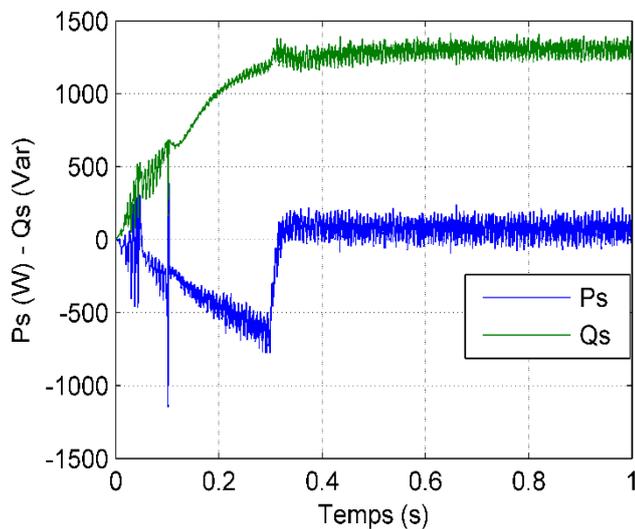


Figure IV.8 : Puissances active et réactive statoriques

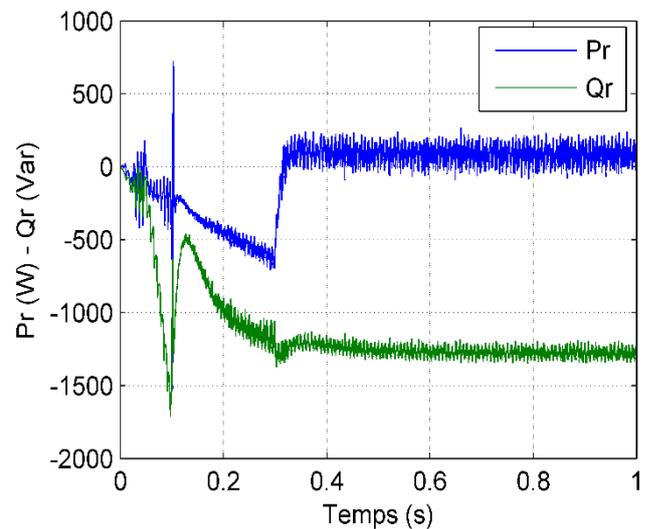


Figure IV.9 : Puissances active et réactive rotoriques

La figure IV.2 montre l'effet de régulation de la tension du bus continu à la sortie des convertisseurs coté machine. On constate que la tension mesurée suit parfaitement sa référence sur toute la période de simulation grâce au contrôle appliqué. Un zoom sur cette grandeur (figure IV.3) montre une faible baisse de la tension de la capacité du bus continu (12 V à 10,5 V) dans les premiers instants de l'amorçage après elle suit sa référence. Cette chute de tension est due à l'énergie fournie pour l'amorçage.

La figure IV.4 donne les allures des flux statoriques. Le flux d'axe direct suit sa valeur de référence et le flux d'axe quadratique est quasiment nul, grâce à une bonne orientation du flux statorique selon l'axe direct. On constate que les allures du flux rotorique illustrées dans la figure IV.5 sont proportionnelles aux allures des flux statoriques.

Les courbes des figures IV.6 et IV.7 confirment la répartition des courants (i_{sd}, i_{rd}) entre les deux armatures.

Les figures IV.8 et IV.9 donnent les puissances active et réactive des deux armatures statorique et rotorique, respectivement. Les puissances actives sont presque nulles, cela est dû aux pertes à effet Joule dans les deux armatures de la machine. Les allures des puissances réactives des deux armatures représentent l'énergie nécessaire pour l'amorçage de la génératrice.

IV.2.2 Impact de la variation de la charge

Dans ce qui suit, nous montrons les résultats obtenus lorsque la génératrice est entraînée à une vitesse de 2300 tr/min pendant toute la durée de simulation. On insère aux instants $t=1s$, $t=2s$ et $t=3s$, à chaque fois, une charge triphasée équilibrée purement résistive de 3.5 kW. Ces charges sont montées en parallèles.

Résultats de simulation et interprétation

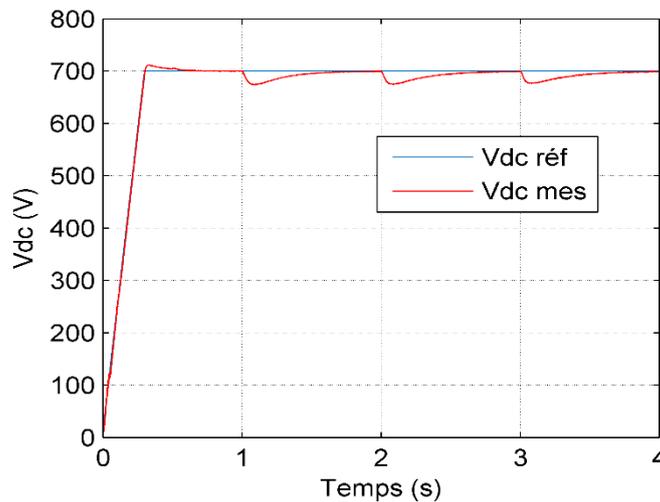


Figure IV.10 : Allures de la tension du bus continu et sa référence

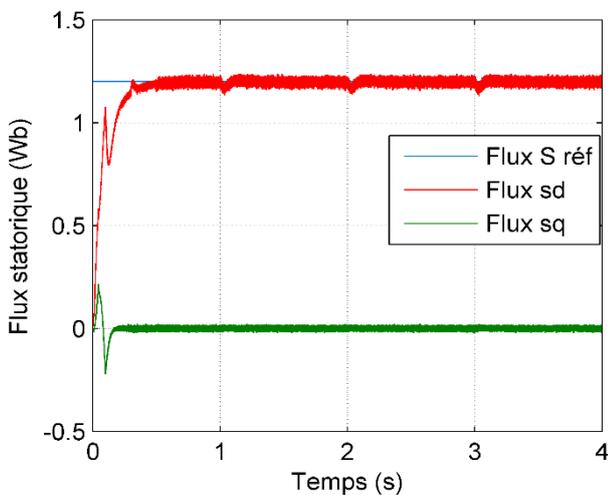


Figure IV.11 : Composantes directe et quadratique du flux statorique

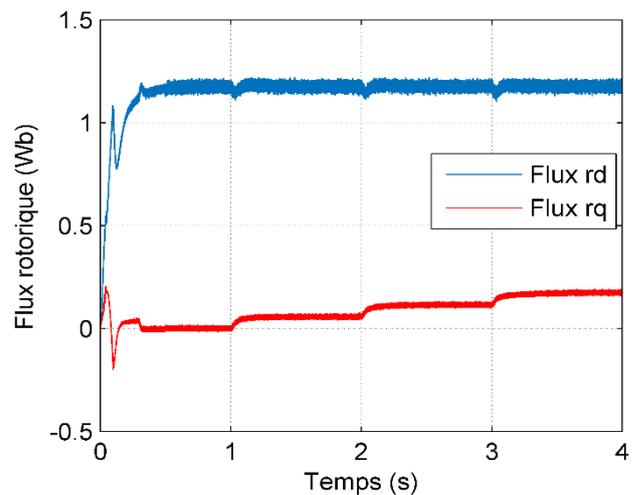


Figure IV.12 : Composantes directe et quadratique du flux rotorique

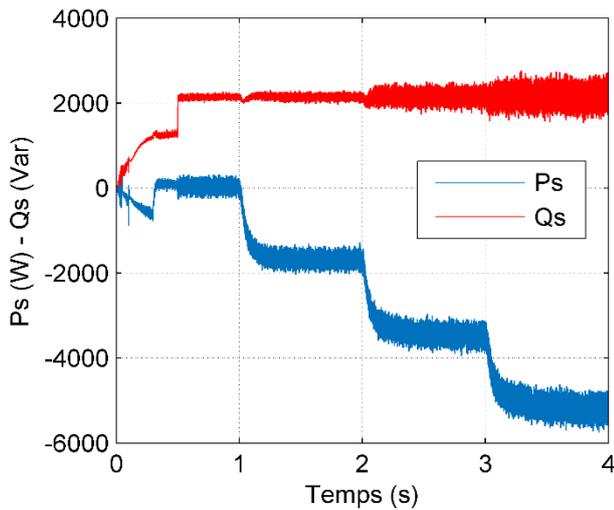


Figure IV.13 : Allures des puissances statoriques

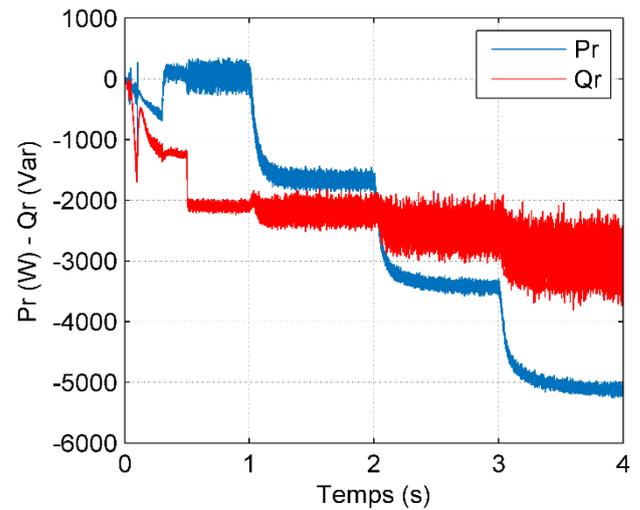


Figure IV.14 : Allures des puissances rotoriques

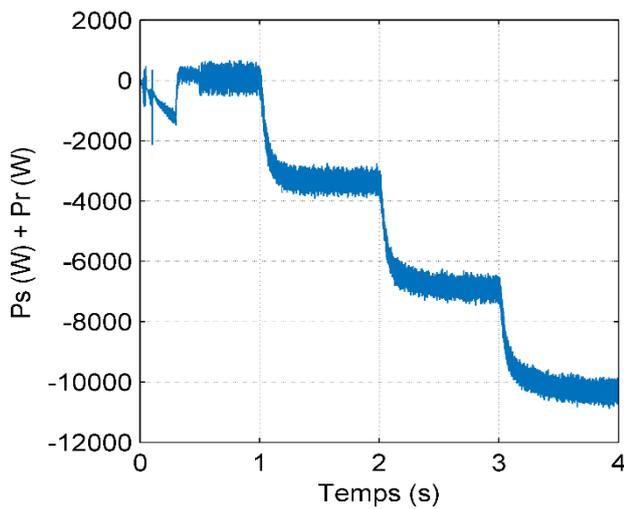


Figure IV.15 : Allures de la somme des puissances actives statorique et rotorique

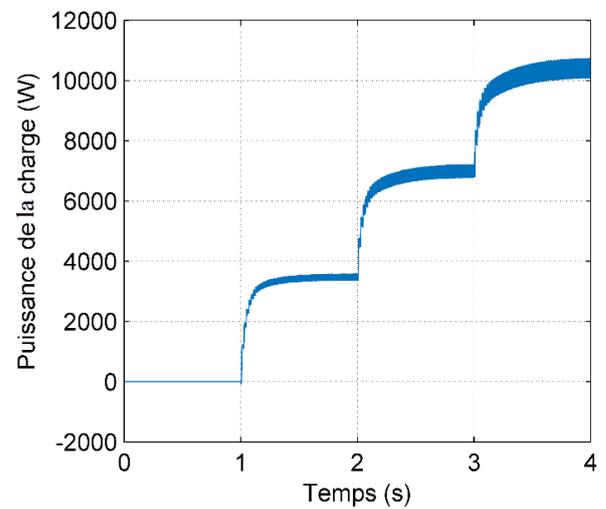


Figure IV.16 : Allure de la puissance de la charge

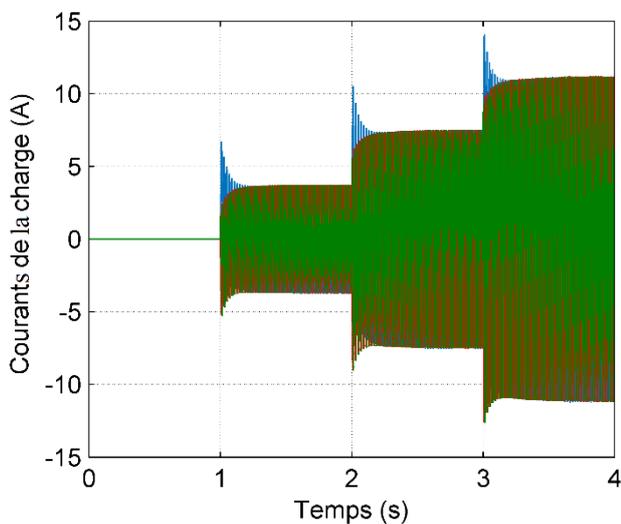


Figure IV.17 : Allures des courants de la charge

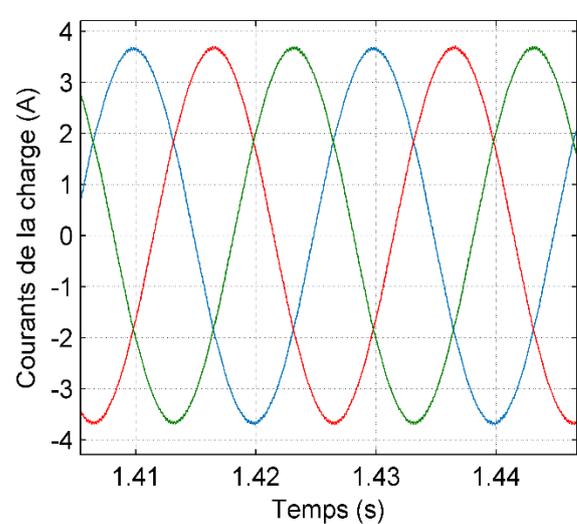


Figure IV.18 : Zoom sur les courants de la charge

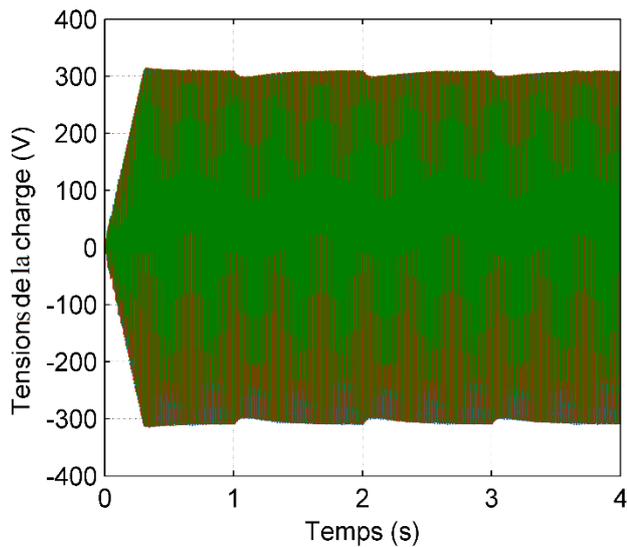


Figure IV.19 : Allures des tensions de la charge

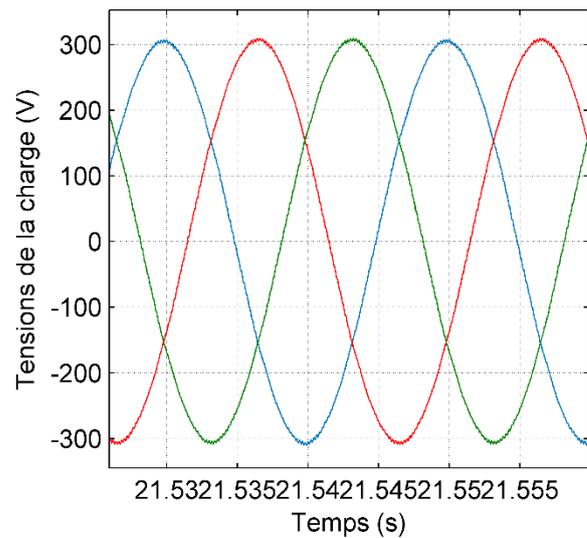


Figure IV.20 : Zoom sur les tensions de la charge

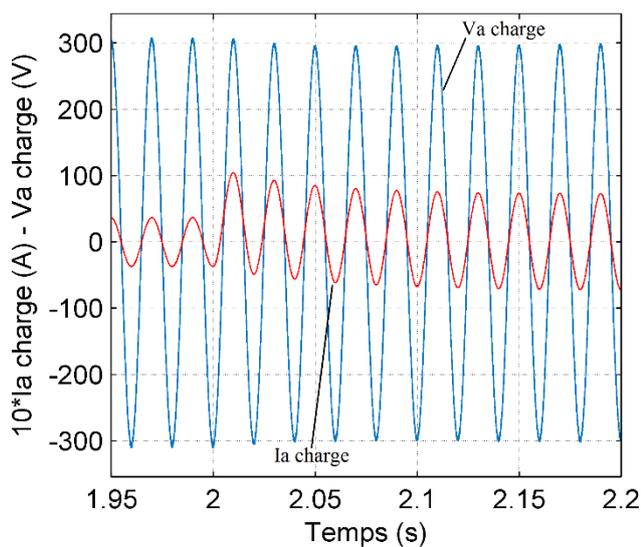


Figure IV.21 : Courant et tension d'une phase

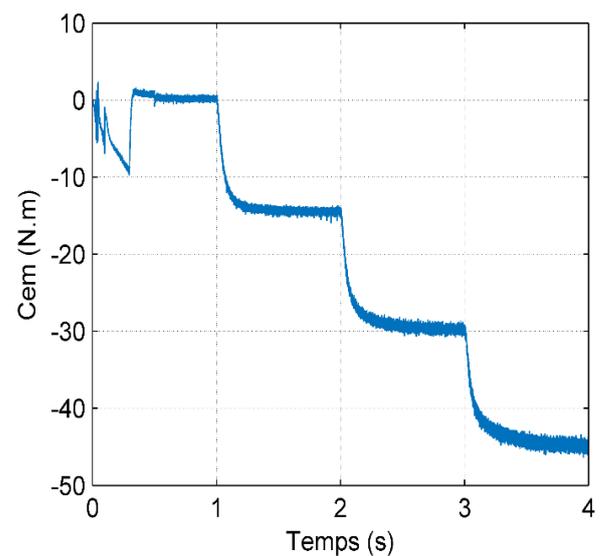


Figure IV.22 : Allure du couple électromagnétique

On remarque que les grandeurs visualisées dans les figures IV.10 - IV.12 suivent leurs références, cela prouve l'efficacité de la commande appliquée.

En comparant les figures IV.13 et IV.14, on constate que les allures des puissances actives statorique et rotorique sont identiques, cela montre que ces deux puissances sont bien réparties entre les deux armatures de la machine. La figure IV.16 montre que la puissance active absorbée par la charge dépasse la valeur nominale de la génératrice, ce qui est l'avantage de notre structure.

Les figures IV.17 - IV.22 montrent l'évolution de la tension, du courant et du couple électromagnétique en fonction de la variation de la charge. On remarque que le courant et le couple sont sensibles à cette variation

contrairement à la tension qui reste fixe. Aussi, on remarque que le couple reste dans sa plage de fonctionnement nominal malgré que la vitesse d'entraînement soit supérieure à la vitesse nominale.

IV.2.3 Impact de la variation de la vitesse

Dans le but d'étudier l'influence de la variation de la vitesse d'entraînement sur les performances de notre système, on utilise le profil de vitesse donné par la turbine qu'on a étudié dans le deuxième chapitre. Une charge triphasée résistive de 3.5 kW est introduite à l'instant $t=8s$. Le comportement des différentes grandeurs sera illustré dans les figures IV.23-IV.35.

Résultats et interprétations

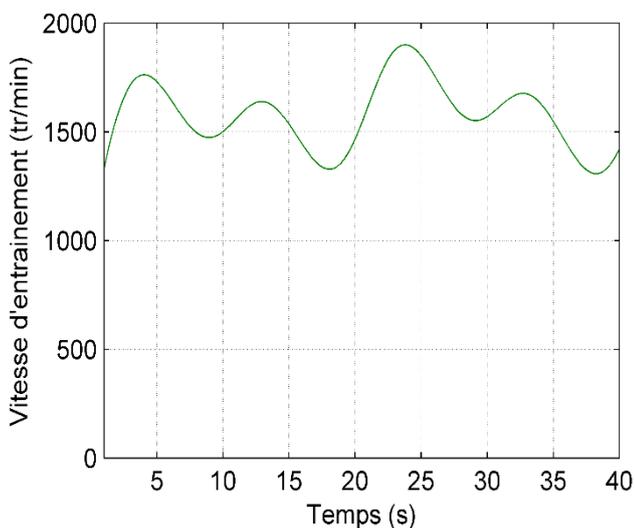


Figure IV.23 : Allure de la vitesse de rotation de la génératrice

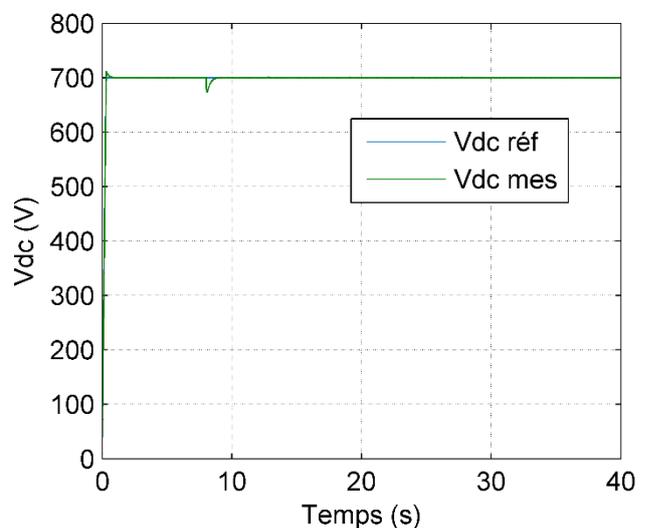


Figure IV.24 : Tensions du bus continu et sa référence

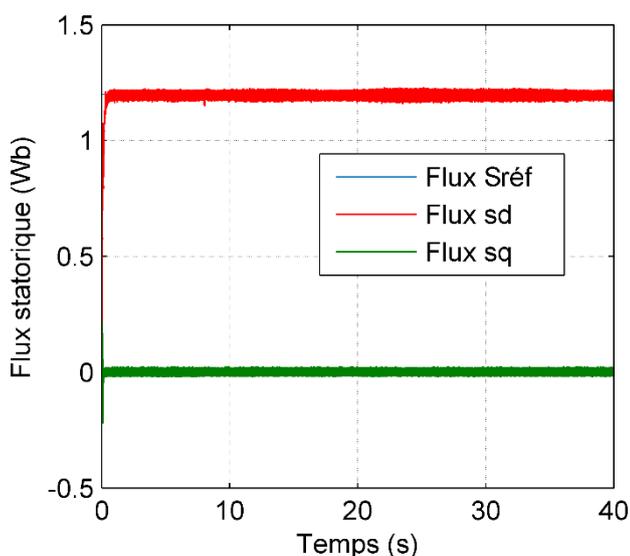


Figure IV.25 : Composantes directe et quadratique du flux statorique

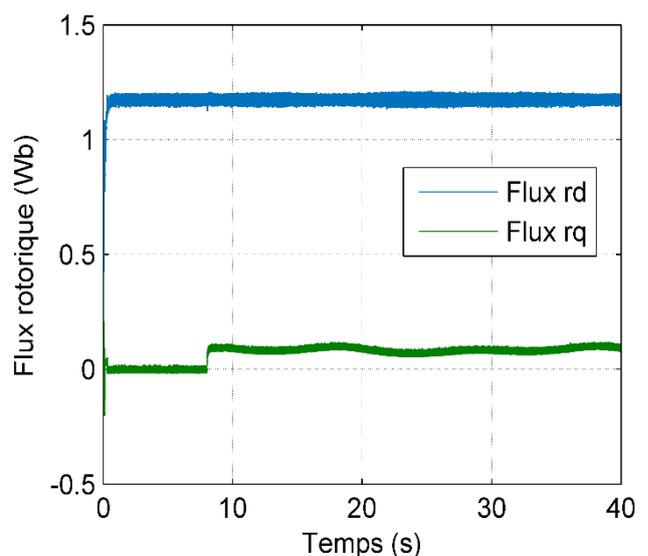


Figure IV.26 : Composantes directe et quadratique du flux rotorique

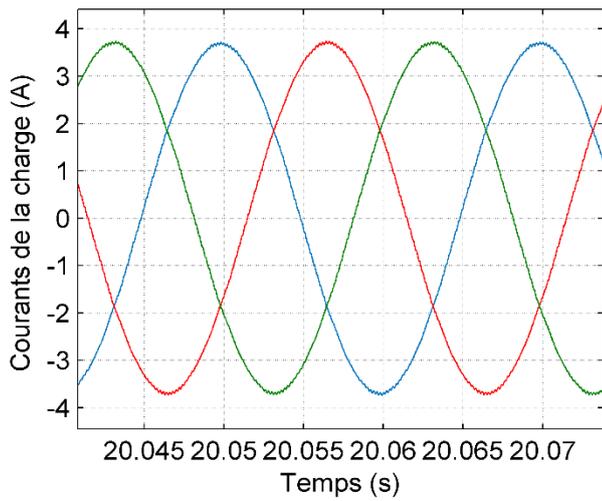


Figure IV.27 : Allures des courants de la charge

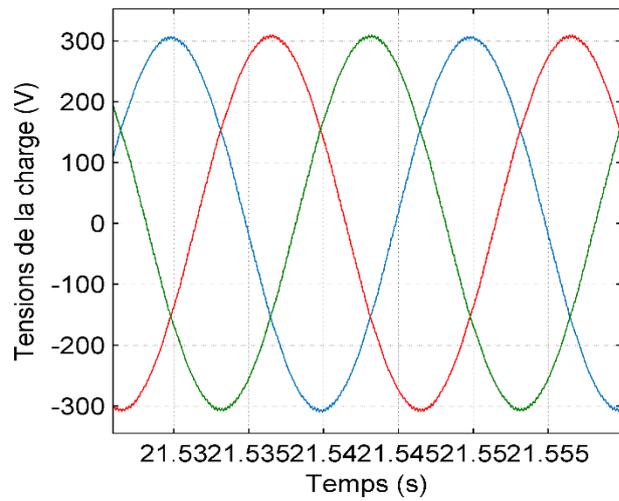


Figure IV.28 : Allures des tensions de la charge

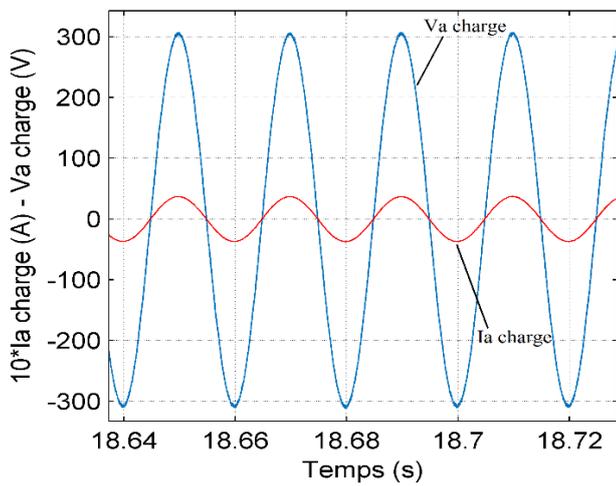


Figure IV.29 : Tension et courant d'une phase

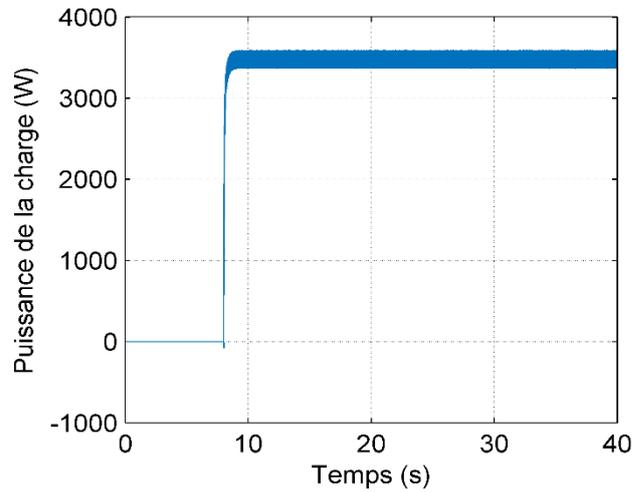


Figure IV.30 : Allure de la puissance de la charge

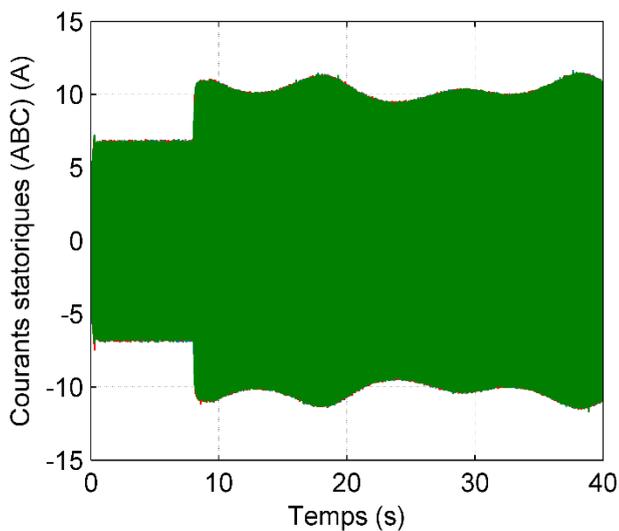


Figure IV.31 : Allures des courants statoriques

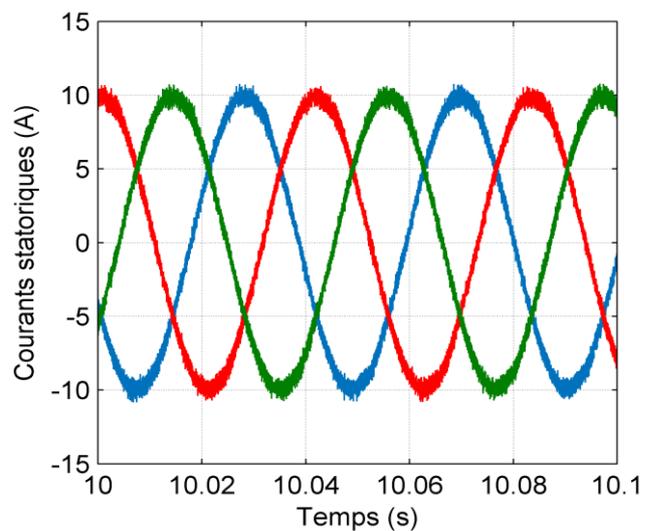


Figure IV.32 : Zoom sur les courants statoriques

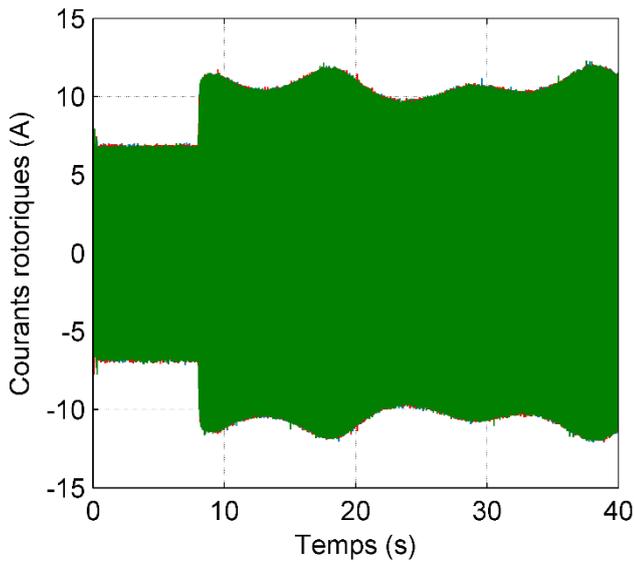


Figure IV.33 : Allures des courants rotoriques

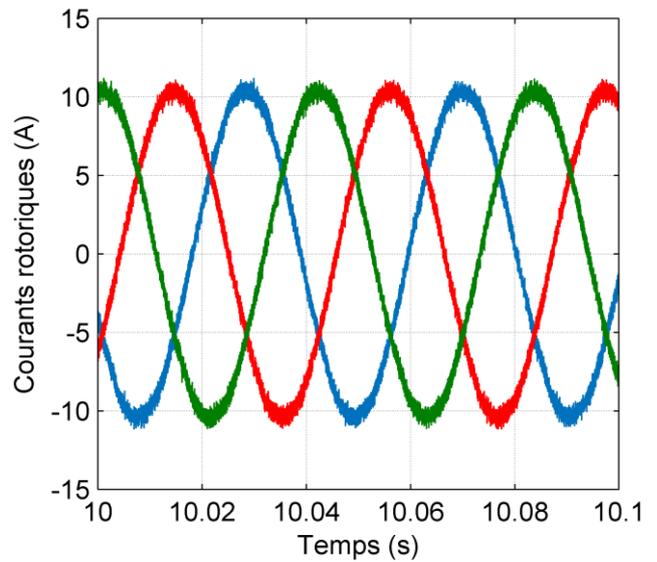


Figure IV.34 : Zoom sur les courants rotoriques

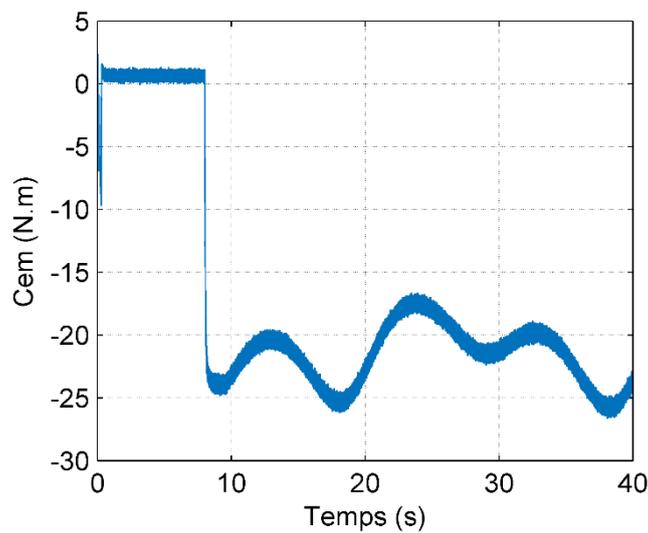


Figure IV.35 : Allure du couple électromagnétique

Les figures IV.24-IV.26 montrent que les grandeurs commandées sont insensibles aux variations de la vitesse de rotation. L'impact de la variation de la vitesse sur les courants et les tensions de la charge est montré sur les figures IV.27 et IV.28 respectivement, où on remarque que ces deux grandeurs sont insensibles à cette variation.

La figure IV.30 représente la variation de la puissance de charge en fonction de la variation de la vitesse, on constate qu'elle est insensible à la variation de cette dernière.

Les figures IV.31-IV.34 représentent l'évolution des courants statoriques et rotoriques. On remarque que l'amplitude de ces deux grandeurs varie en fonction de la variation de la vitesse contrairement à leur

fréquence qui reste fixe. Sachant que le couple est proportionnel au courant, on conclue que le couple est aussi sensible à la variation de la vitesse, ce qui est confirmé dans la figure IV.35.

IV.3 Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à tester sur l'environnement MALAB/Simulink les performances de la commande d'une génératrice asynchrone double alimentée afin de bien contrôler la tension continue à la sortie des deux convertisseurs coté machine pour des variations de vitesse et/ou charge.

Les résultats de simulation ont montré d'une manière générale, la capacité de notre structure à fonctionner à vitesse et/ou à charge variable. On constate une bonne régulation de la tension redressée pour les variations de vitesse mais une certaine sensibilité aux variations de la charge. Toutefois, la régulation permet à cette tension de retrouver rapidement sa valeur référence.

Une fois que la tension continue est contrôlée à sa valeur de référence pour une plage donnée, on peut alimenter une charge isolée avec des tensions d'amplitude et de fréquence fixe à travers un convertisseur coté charge.

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire est l'étude d'un système éolien à base d'une machine asynchrone à rotor bobiné double alimentée totalement interfacée en fonctionnement autonome dans le cas de l'alimentation de sites isolés.

Dans le premier chapitre, nous avons d'abord donné un état de l'art sur l'énergie éolienne. Ensuite, nous avons présenté quelques chaînes de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique connectées au réseau puis les chaînes exploitées dans stations isolées et autonomes. Enfin, pour des raisons techniques (possibilité de fonctionner sur large gamme de la vitesse du vent, possibilité de fournir une puissance électrique supérieure à la valeur nominale, etc.) et économiques (coût de production moins élevé en raison de la taille des convertisseurs et des filtres), nous avons retenu le système utilisant la machine asynchrone à double alimentation totalement interfacée pour effectuer son étude dans le cas d'un système éolien de petite puissance.

Ensuite, nous avons abordé, dans le deuxième chapitre, la modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation et une interface d'électronique de puissance composée de trois convertisseurs MLI et d'un bus continu. Ce chapitre nous a permis de donner les équations de la génératrice dans le repère triphasé, puis dans le référentiel biphasé tournant d'axe (dq) par la transformation de Park, en vue de sa commande.

Dans le troisième chapitre, on a proposé une stratégie de contrôle vectorielle pour permettre de maintenir constante la tension à la sortie des deux convertisseurs coté machine et cela en se basant sur le principe de l'orientation du flux statorique. La structure totalement interfacée avec la charge isolée permet de gérer le partage d'énergie entre le stator et le rotor et présente l'avantage de fonctionner sur une large plage de vitesse de rotation.

Enfin, le quatrième chapitre a été consacré à l'application de la technique de commande proposée dans le troisième chapitre à la génératrice asynchrone et la visualisation des résultats obtenus. L'évolution du système pour une variation de la charge et de la vitesse d'entraînement est testée et les résultats de simulation ont démontré que le contrôle proposé est capable de rejeter les perturbations extérieures comme les variations de la charge et de la vitesse d'entraînement même sur une grande plage de transition.

Pour la continuité de ce travail, nous envisageons :

- Simuler le système global pour alimenter des charges triphasées à effet inductif et à effet capacitif ;
- Pour la commande, on envisage l'utilisation des régulateurs avancés à la place des régulateurs classiques PI ;
- Intégrer un système de stockage dans le système éolien étudié.

Références bibliographiques

- [Rem 17] : Remli Aziz, « Etude, commande et supervision d'un parc de source d'énergie décentralisées », thèse de Doctorat, Université A.MIRA-BEJAIA, 2017.
- [Amm 20] : <https://www.ammonit.com/fr/windinfo/informations-eolien>, consulté juin 2020.
- [Edf 20] : <https://www.edf.fr/edf/accueil-magazine/une-breve-histoire-de-l-eolienne>, consulté juin 2020.
- [Add 13] : Addour Miloud, Allouti Lyes, « Etude et maximisation d'un système éolien », mémoire de Master, Université A.MIRA-BEJAIA, 2013.
- [Abd 18] : Abdoun Fateh, « Amélioration des performances des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à double alimentation », thèse de Doctorat, Université A.MIRA-BEJAIA, 2018.
- [Aou 17] : Aouchenni Ounissa, « Amélioration de l'intégration de la production éolienne dans les réseaux électriques », thèse de Doctorat, Université A.MIRA-BEJAIA, 2017.
- [Sur 20] : <https://www.surtec.fr/sites-autonomes-en-energie/principe>, consulté juillet 2020.
- [Mir 05] : A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [Idj 10] : Kassa Idjedaren, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éolienne autonomes », thèse de Doctorat, université A.MIRA-BEJAIA, 2010.
- [Mes 17] : Mesai Ahmed Hamza, Nadir Kais, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l'intelligence artificielle », mémoire de Master, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [El-Aim 04] : Mme Salma El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille et l'université des sciences et technologies de Lille, 2004.
- [Cde 20] : https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_028_06.pdf, consulté mai 2020.
- [BAGB 17] : B. Benyachou, F. Ait Ouhrouch, K. Gueraoui, B. Bahrar, « Modélisation sous MATLAB/Simulink d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) », 13ème congrès de la mécanique à Meknès - Maroc, 2017.

[All 17] : Mr. Allam Mohhamed, «Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable», thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes – Sidi Bel Abbès, 2017.

[Zai 14] : Adnane Zaimi, « Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents », mémoire d'Ingénieur, Conservatoire national des arts et métiers, centre du Maroc, 2014.

[Ben 10] : L. Benalia, «Commande en tension des moteurs à induction double alimentés», thèse de Doctorat, université de Batna, 2010.

[Abdr 17] : Z. Abderrahime, «Contribution à la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) par les techniques intelligentes», thèse de Doctorat, université de Msila, 2017.

[Abd11]: Abdoune Fateh, «Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à rotor bobiné», mémoire de Magister, Université A.Mira - Béjaïa, 2011.

Annexes A

Paramètres de la turbine :

- Rayon des pales : $R = 3.25 \text{ m}$
- Masse volumique de l'air : $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$
- Rapport de multiplication : $G = 5.06$
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.071 \text{ N.s/m}$
- Inertie totale ramenée sur l'arbre rapide : $J = 1 \text{ kg.m}^2$

Paramètres de la MADA :

- Nombre de paires de pôles : $p = 2$
- Puissance nominale de la machine : $P_n = 7.5 \text{ kW}$
- Résistance statorique : $R_s = 0.445 \Omega$
- Résistance rotorique : $R_r = 0.620 \Omega$
- Inductance cyclique statorique : $L_s = 0.084 \text{ H}$
- Inductance cyclique rotorique : $L_r = 0.081 \text{ H}$
- Inductance mutuelle mutuelle : $L_m = 0.078 \text{ H}$

Annexes B

Calcul des régulateurs PI avec compensation :

Nous développons ici une autre conception du régulateur PI, dite méthode de compensation des pôles.

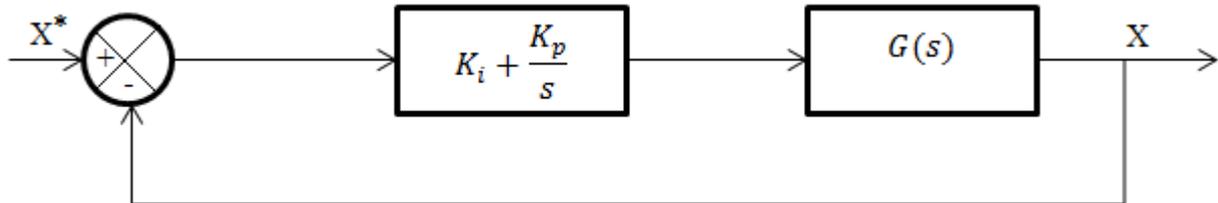


Figure B.1: Schéma bloc d'un processus régulé par un PI

Avec :

- K_i : est le gain intégral du régulateur
- K_p : est le gain proportionnel du régulateur.

Si on considère la fonction de transfert $G(s)$ pour un processus associé à ce correcteur :

$$G(s) = \frac{G}{1+\tau.s}$$

Tel que G est le gain statique et τ est la constante du temps du processus.

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$F_{BO}(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \frac{G}{1+\tau.s}$$

Afin d'éliminer le zéro présent dans la fonction de transfert en boucle ouverte, nous introduisons l'égalité suivante :

$$\tau = \frac{K_p}{K_i}$$

Ainsi, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$F_{BO}(s) = \frac{G.K_i}{s}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$F_{BF}(s) = \frac{G.K_i}{G.K_i + s}$$

Le temps de réponse t_r du système bouclé pour atteindre 95% de la consigne vaut :

$$t_r = \frac{3}{G.K_i}$$

On peut alors exprimer les gains du correcteur en fonction des paramètres du processus et du temps de réponse choisi :

$$K_p = \frac{3.\tau}{G.t_r}$$

$$K_i = \frac{3}{G.t_r}$$

Les valeurs numériques des temps de réponse en boucle fermée des différentes grandeurs sont données ci-dessous :

Courants du stator : 10 ms

Courants du rotor : 10ms

Flux du stator : 200ms