



Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département d' Electrotechnique



Thèse

Préparée au sein du Laboratoire de Recherche LSPIE-Batna'2000

Présentée pour l'obtention du titre de :
Docteur en Sciences en Electrotechnique
Option : Energies Renouvelables

Sous le Thème :

**Contribution à la Maîtrise et au Contrôle des Transferts de
Puissances d'un Aérogénérateur à base d'une
Machine à Induction**

Présentée par :

MEKKAOUI Naïma

Devant le jury composé de :

M. NAÏT-SAÏD	Nasreddine	Prof.	Université de Batna 2	Président
M. NAÏT-SAÏD	Mohamed-Saïd	Prof.	Université de Batna 2	Rapporteur
M ^{me} ZIDANI	Fatiha	Prof.	Université de Batna 2	Examineur
M. BETKA	Achour	Prof.	Université de Biskra	Examineur
M. BENAKCHA	Abdelhamid	Prof.	Université de Biskra	Examineur
M. BOUREK	Amor	Prof.	Université de Biskra	Examineur

Juin 2018

REMERCIEMENTS

Au Nom d'Allah le Clément, le Miséricordieux

Tout d'abord je remercie Allah Tout Puissant de m'avoir donné la force, la patience et la volonté pour réaliser ce travail dans des meilleures circonstances et en bonne santé.

Ce travail a été préparé au sein du Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques **LSP-IE**, sous la direction du Dr. **Nasreddine Naït-Saïd**, Professeur de l'université de Batna

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au Dr. **Mohamed-Saïd Naït-Saïd**, Professeur à l'Université de Batna, qui a assuré la direction scientifique de ce travail. Au cours ces années de recherches, j'ai pu apprécié en sa personne un encadrement scientifique de qualité. Je lui remercie pour ses conseils pertinents et éclairés, son aide était pour moi d'une importance capitale dans la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici, tout mon respect et ma profonde reconnaissance.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur **N. Naït-Saïd**, Professeur à l'Université de Batna, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Mes remerciements vont de même aux autres membres de jury examinateurs qui m'ont fait l'honneur de participer au jury pour pouvoir évaluer cette thèse. Il s'agit, en l'occurrence de :

<i>M^{me}</i>	<i>ZIDANI</i>	<i>Fatiha,</i>	<i>Professeur à l'Université Batna 2,</i>
<i>M.</i>	<i>BETKA</i>	<i>Achour,</i>	<i>Professeur à l'Université de Biskra,</i>
<i>M</i>	<i>BENAKCHA</i>	<i>Abdelhamid,</i>	<i>Professeur à l'Université de Biskra,</i>
<i>M.</i>	<i>BOUREK</i>	<i>Amor,</i>	<i>Professeur à l'Université de Biskra,</i>

Je remercie également Mesdames Fatima Zohra LOUAI, Professeurs à l'Université de Batna, Wassila, Secrétaire au département électrotechnique et Melle S. Zeggada Ing au Labo **LSP-IE** pour leurs encouragements.

Je voudrais remercier tout particulièrement ma mère pour tout ce qu'elle a fait pour moi pour m'offrir toutes les conditions nécessaires pour que je puisse devenir ce que je suis. Ma reconnaissance envers elle est inexprimable et autant pour mes frères et ma sœur pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de mon cursus.

N. MEKKAOUI

Lab. LSPIE, Septembre 2018

*A la mémoire de mon très cher père
A ma maman qui m'a tant soutenue pendant toutes ces longues années d'études*

*A mes frères et à ma soeur
A mes Nièces et mes Neveux*

*Pour leur gentillesse, leur amour et leur soutien
Je dédié ce modeste travail*

مساهمة في التحكم و التحكم في عمليات نقل الطاقة لمولد هوائي غير متزامن باستناد على ماكينة الحث

ملخص– يعتمد العمل المنجز في هذه الرسالة على مولد هوائي غير متزامن ذو السرعة المتغيرة على أساس الماكينة الاتزامنية ذات التغذية المزدوجة الأكثر استخداما في التوليد الطاقة الكهربائية في كل من الشبكات النائية والمترابطة. الاستفادة من الإمكانيات التي توفرها لنا السرعة المتغيرة في العمل على تحقيق أعلى مردود أثناء التحكم في نقل الطاقة(استطاعة) بين الجزء الثابت والشبكة عن طريق التحكم المباشر و المنفصل للطاقتين الفعلية والغير الفعلية و لضمان الأداء الديناميكي العالي و الأفضل للألة المذكورة سالفًا من جهة، ولجعل النظام غير حساس للتغيرات العوامل من جهة أخرى. قمنا بتبني طريقتين جديدتين المتمثلة في النظام التحكم المباشر و المنفصل للطاقتين سالفتين الذكر التي تم تنسيقها في شكل مركب لتقليل بالقدر الكافي لوقت التحكّم ; المقاربة الأولى هي التي أعطيت من قبل خط رجعي مركب ل (GADA)و المقاربة الثانية هو لنهج المستوحى من DTC حيث التحكم في الاستطاعة فعلية و غير فعلية يتم تسجيله في شكله الظاهر S-Power الذي يتم تنفيذه من خلال تعديل SVM يسمى تحديد ISVM (تعديل المتجه الفضائي الخيالي) وقد أثبتت هذه الأساليب من خلال محاكاة قوتها بأنهما أقل حساسية للتغيرات البارامترية (العوامل) ويمكنهما الحصول على مزايا الأداء الديناميكي خاصة في اقل وقت للحوسبة وبشكل خاصة مع استخدام خوارزمية تشكيل متجه ISVM

كلمات مفاتيح:

مولدة للاتزامنية ذات التغذية المزدوجة، التمثيل المركب ، التحكم المباشر و المنفصل ، التحكم في خط رجعي مركب , ISVM (تعديل المتجه الفضائي الخيالي) , التحكم في الاستطاعة الظاهرية (S- Power)

Contribution à la Commande et au Contrôle des Transferts de Puissances d'un Aérogénérateur à Base d'une Machine à Induction

Résumé– Le travail mené dans cette thèse est basé sur l'aérogénérateur à vitesse variable à base de la GADA (Génératrice Asynchrone Double Alimentée) qui est très utilisée pour les réseaux insulaires et interconnectés tout en profitant des possibilités offertes par la vitesse variable pour pouvoir opérer à des points de rendement maximaux tout en contrôlant le transfert de puissance entre le stator et le réseau par des commandes directes et découplées des puissances actives et réactives. Cela étant d'une part pour assurer de hautes performances dynamiques du system, et d'autre part pour le rendre le système robuste contre les variations paramétriques. Deux nouvelles approches de commandes directes et découplées de puissances ont été adoptées et qui ont été formulées sous une forme complexe permettant de réduire suffisamment le temps de calcul du contrôle. La première approche est celle donnée par retour d'état complexe pour une GADA alimentant un site isolé et la seconde approche est celle inspirée d'une DTC (*Direct Torque Control*) où le contrôle des puissances actives et réactives est réalisé sous sa forme apparente ou S-Puissance qui s'effectuera à travers la modulation de la largeur d'impulsion vectorielle, ou SVM (*Space Vector Modulation*), particulière appelée ISVM (*Imaginary Space-Vector Modulation*). Ces dites approches ont prouvé par simulation leur robustesse et en étant moins sensibles aux variations paramétriques et en permettant d'acquérir des avantages relatifs aux performances dynamiques surtout en temps de calcul réduit et notamment avec l'utilisation de l'algorithme de la modulation vectorielle ISVM.

Mots Clés– Génératrice asynchrone à double alimentation, Modélisation complexe, Commande S-Puissance, ISVM, Contrôle par retour d'état complexe, Commande directe et découplée.

Contribution to the Control and Control of Power Transfers Based of Aerogenerator of an Induction Machine

Abstract— The work given in this thesis based on the variable speed wind turbine using the DFIG (Double Fed Induction Generator) which is widely used in wind generation for both insular and interconnected networks. The offered advantage possibilities by the variable speed are to operate at maximum yield functioning points while controlling the transferred powers between the stator and the network by the direct and the decoupled controls of active and reactive powers. These controls yield to ensure the high dynamic performances of the system making it insensitive to parametric variations. Two new proposed approaches of the direct and the decoupled control powers formulated in complex form, which permit to reduce sufficiently the computing time of the control. First approach is that given by the complex state feedback for a DFIG feeding an isolated site, while the second approach is that inspired from a DTC (*Direct Torque Control*) where the control of the active and reactive powers is controlled in its apparent form or S-Power which performed through the particular space vector modulation so-called ISVM (*Imaginary Space-Vector Modulation*). The effected simulations on the new approaches prove their robustness against the parametric variations allowing the dynamic performances especially the reduced computing time using the ISVM as vector modulation algorithm.

Index Terms—Doubly fed induction generator (DFIG), Complex Modelling, Direct S-power control (DSPC), Complex feedback control, Decoupling control, Imaginary space vector modulation (ISVM).

SOMMAIRE

RESUME ET MOTS CLES	i
SOMMAIRE (Références bibliographiques sont données par chapitre)	iv
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES	xvii
LISTE DES ACRONYMES ET SYMBOLE	xix

CHAPITRE 0

INTRODUCTION GÉNÉRALE

0-1 Contexte de l'Eolien	1
0-2 Objectif du Travail : Génératrices Asynchrones	2
0-3 Structure de la Thèse	3
0-4 Bibliographie	4

CHAPITRE 1

SURVOL SUR L'AEROGÉNÉRATEUR ASYNCHRONE VIA UNE ÉOLIENNE

1.1 Introduction	5
1.2 Historique de l'éolien	6
1.3 Perspectives de l'éolien dans le monde et en Algérie	7
1.4 Description d'un système de turbine éolienne	8
1.4.1 Types des turbines éoliens	8
1.4.2 Synoptique global du système éolien	10
1.4.3 Présentation d'une turbine éolienne à axe horizontal	10
1.5 Conversion cinétique–mécanique (C–M) de l'éolienne	12
1.5.1 Conversion C–M de la pale	12
1.5.2 Conversion Cinétique–Puissance d'un tube à air	14
1.5.3 Loi de Betz et coefficient de puissance	15

1. 6 Conversion électromécanique (EM)	18
1.6.1 Production d'énergie mécanique	18
1.6.2 Production EM à éoliennes à vitesse fixe	21
1.6.3 Production EM à éoliennes à vitesse variable	22
1.6.4 Modèle d'une turbine éolienne	25
1.7 Conclusion	27
1.8 Bibliographie	27

CHAPITRE 2

MODÉLISATION À FORMULATION COMPLEXE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE SIMPLE ET DOUBLE ALIMENTÉE

2.1 Introduction	31
2.2 Modèle triphasé de la machine asynchrone	32
2.2.1 Hypothèses simplificatrices	32
2.2.2 Modèle de la machine asynchrone triphasée	32
2-3 Transformation Conformes	34
2.3.1 Transformation Phaseur	35
2.3.2 Transformation Rotation « Park 2×2 »	36
2-4 Modélisation à formulation complexe d'une machine asynchrone	36
2.4.1 Modèle complexe de la MAS dans référentiels séparés	36
2.4.2 Modèle complexe de la MAS dans référentiel de Park	37
2-5 Applications : génératrices asynchrones simple (GAS) et double alimentée (GADA/MAD)	38
2.5.1 Simulation de la génératrice asynchrone (GAS)	38
2-5-2 Simulation de la génératrice double alimentée (GADA)	42
2-6 Conclusion	47
2-7 Bibliographie	47

CHAPITRE 3

**MODÉLISATION ET ALGORITHMIQUE DES TECHNIQUES MODULATION DE LARGEUR
D'IMPULSIONS : Technique ISVM (*Imaginery Space Vector Modulation*)**

3-1 Introduction	50
3.2 Définitions Onduleur/MLI	52
3.2.1 MLI	52
3.2.2 Onduleur	53
3.3 MLI–Sinusoïdales (triphasées) naturelle ou régulière	54
3.3.1 Définitions	54
3.3.2 Entre synchronisme & asynchronisme des MLI	59
3.4 MLI–Vectorielle ou SVM	59
3.5 MLI–Vectorielle–« Imaginaire » ou ISVM	65
3-6 Conclusion	73
3-7 Bibliographie	74

CHAPITRE 4

**COMMANDE "S–PUISSANCE " D'UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTÉE
CONNECTÉE AU RÉSEAU**

**(" S–POWER" CONTROL OF A DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR
–DFIG– CONNECTED TO THE GRID)**

4.1 Introduction	77
4.2 Dérives paramétriques	78
4.2.1 Dérives paramétrique dans la commande <i>FOC</i>	78
4.2.2 Dérives paramétrique dans la commande <i>DTC</i>	80
4.3 Commande scalaire de la GAS	82
4.3.1 Description du Système de régulation	82
4.3.2 Résultats de simulation	83
4.4 Commandes vectorielles de la GADA	84
4.4.1 Banc à flux statorique orienté d'une GADA	85
4.4.2 Commande vectorielle directe des puissances	86
4.4.3 Commande vectorielle indirecte des puissances en « P-BO » & « I-BF »	87

4.4.4	Commande vectorielle indirecte des puissances en « P-BF » & « I-BF »	88
4.4.5	Résultats de la simulation des commandes vectorielles des puissances	89
4.5	Contrôle par retour " feedback " complexe de la tension du stator	91
4.5.1	Tensions complexe stator – rotor	91
4.5.2	Loi de commande par un retour d'état complexe, " <i>Feedback Complexe Law Control</i> "	92
4.5.3	Résultats de simulation	95
4.6	"S-Puissance" commande d'une GADA connectée sur un réseau	98
4.6.1	Estimation du flux du rotor par la stratégie S-Power	99
4.6.2	Contrôle direct de la puissance "Direct S-power"	100
4.6.3	Résultats de Simulation et Discussion	101
4-5	Conclusion	106
4-6	Bibliographie	107

CHAPITRE 5

STOCKAGE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE : APERÇU ET PROBLÉMATIQUE

5.1	Introduction	110
5.2	Les différentes technologies de stockage de l'électricité	111
5.2.1	Stockage long terme	112
5.2.2	Synthèse sur le stockage à long terme	117
5.3	Stockage d'énergie à court terme	118
5.3.1	Le stockage inertiel	118
5.3.2	Super-capacité	120
5.3.3	Inductance supraconductrice (SMES Superconducting Magnet Energy Storage)	120
5.4	Comparaison des systèmes de stockage d'énergie	1121
5.5	Les rôles du stockage de l'énergie	123
5.6	Participation aux services du système électrique	124
5.6.1	La participation au Réglage de la fréquence	125
5.6.2	La participation au réglage de la tension	127
5.7	Conclusion	128
4-6	Bibliographie	129

CHAPITRE 6
CONCLUSION GÉNÉRALE

6.1 Résumé–Bilan	132
6.2 Apports	134
6.3 Perspectives	135
Annexe A	136

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Les dix premiers producteurs de l'énergie d'éolienne dans le monde (MW).	8
Figure 1.2. Carte annuelle d'Algérie de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s)	8
Figure 1.3. Éoliennes à axe vertical.....	9
Figure 1.4. Éoliennes à axe horizontal.....	10
Figure 1.5. Synoptique du système aérogénérateur éolien.....	10
Figure 1.6. Éléments d'une turbine éolienne à axe horizontal.....	11
Figure 1.7. Forces inductives par le vent appliquées sur une pale.....	12
Figure 1.8. Flux d'air sur un profil de pale " stall control ".....	13
Figure 1.9. Variation de l'angle de calage d'une pale	14
Figure 1.10. Colonne d'air animée d'une vitesse	15
Figure 1.12. Caractéristique du coefficient de puissance	16
Figure 1.13. Illustration de la vitesse du vent V_v et la vitesse tangentielle $\Omega_t R_t$	17
Figure 1.14. Illustration des différentes $C_p-\lambda$ pour différents types d'éoliennes.....	18
Figure 1.15 Famille courbes de la caractéristique $C_p=f(\lambda,\beta)$	19
Figure 1.16 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	20
Figure 1.17. Stratégie optimale d'une éolienne à vitesse variable selon la vitesse du vent.	21
Figure 1.18 Connexion sur un réseau d'une génératrice AC à fréquence variable par interface électronique puissance.....	21
Figure 1.19. Aérogénérateur asynchrone simple alimentation (GAS) connectée au réseau.	22
Figure 1.20-a Aérogénérateur asynchrone double alimentation (GADA) connectée au réseau Energie rotor unidirectionnelle.....	23
Figure 1.20-b Aérogénérateur asynchrone double alimentation (GADA) connectée au réseau Energie rotor bidirectionnelle.....	24
Figure 1.21. Synoptique global du modèle d'une turbine d'éolienne.....	26
Figure 2.1. Schéma du modèle d'une MAS triphasée.....	31
Figure 2.2 Construction vectorielle d'un phaseur d'un système de courant triphasé.....	34
Figure 2.3. Représentation du complexe x selon les trois repères plans orthogonaux.....	35
Figure 2.4. Chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice asynchrone auto-amorcée.....	37
Figure 2.5 phénomènes d'auto-amorçage	39

Figure 2.6 Résultats de simulation d'une GAS amorcée et chargée.....	41
Figure 2.7 Fonctionnement de la GADA en hypo synchrone.....	44
Figure 2.8 Fonctionnement de la GADA en hyper synchrone.....	44
Figure 2.9 Fonctionnement de la MADA en hypo synchrone.....	45
Figure 2.10 Fonctionnement de la MADA en hyper synchrone.....	45
Figure 3.1. Illustration du processus de production d'une MLI (bipolaire) Avec signaux : modulatrice, porteuse, MLI-Bipolaire et signal restitué par filtrage.....	52
Figure 3.2. L'onduleur de tension triphasé à deux étages connecté à une charge.....	53
Figure 3.3 MLI-Sinusoïdales: MLI-Naturelle (en haut) , MLI-régulière (aumilieu) MLI- bipolaire restituées naturelle & régulière (en bas).....	54
Figure 3.4. MLI régulière émanant d'une modulatrice échantillonnée (6 périodes d'échantillonnage T).....	55
Figure 3.5. a)Tensions : Référence (modulatrice), phase onduleur et tension restituée b) Spectre harmonique tension onduleur (MLI-naturelle), fréquence porteuse 5kHz.....	57
Figure 3.6 Représentation complexe d'un onduleur de tension à deux niveaux :Tension référence sinusoïdale (modulatrice) et tension onduleur/phase.....	60
Figure 3.7 6-Secteurs onduleur complexe et décomposition vectorielle tension référence en 2D ausecteur.....	63
Figure 3.8 Génération d'Impulsions selon ISVM/Secteur 1.....	66
Figure 3.9 Temps versus temps des T_{ar} , T_{br} , T_{cr} , T_{max} , T_{min} , T_{eff}	68
Figure 3.10 Temps versus temps des T_{eff} (effectif), T_0 (mort) , T_{offset} (position)	69
Figure 3.11 Temps versus temps des « modulatrices temporelles » triphasés T_{ga} , T_{gb} , T_{gc}	69
Figure 3.12 Comparaison modulatrice et porteuse temporelle et MLI-ISVM pour la phase	70
Figure 3-13 Tensions d'onduleur de la phase A, de sa référence en continu & et de sa restituée en « hachée »: S/Fig.– haut ISVM, S/Fig.–bas MLI-Naturelle	71
Figure 3-14 Tensions de référence en continu & les 2 restituées en « hachée » selon ISVM, & MLI-Naturelle	72
Figure 3-15 Spectre harmonique, pour le cas ISVM, de la phase A — fréquence de commutation à 5kHz & fréquence de la modulatrice à 220V/50 Hz.....	72
Figure 3-16 Spectre harmonique, pour le cas MLI-Naturelle, de la phase A - fréquence	73

de commutation à 5kHz & fréquence de la modulatrice à 220V/50Hz.....	
Figure 4-1. Le schéma du contrôle de tension de la GAS.....	81
Figure 4.2 a) Allure de l'enveloppe de la tension statorique pour des charges variantes	82
Figure 4.2 b) Allure de l'enveloppe du courant statorique pour des charges variantes	82
Figure 4.2 c) Allure de l'enveloppe du courant de charge pour des charges variantes	82
Figure 4.3 Schéma bloc de la GADA sous les contraintes du flux et de la tension orientés.....	85
Figure 4.4 Schéma block de la CV directe des puissances d'une GADA.....	86
Figure 4.5. Schéma block de CV indirecte des puissances en P-BO & en IBF.....	87
Figure 4.6 Schéma block de CV indirecte des puissances en P-BF & en I-BF.....	88
Figure 4.7 Résultat de simulation pour les commandes vectorielles de la GADA connectée au réseau.....	90
Figure 4.8 Schéma bloc du modèle de contrôle proposé de la GADA.....	94
Figure.4.9 Variation de la vitesse du rotor en fonction de temps.....	96
Figure.4.10 Variation de la puissance Active et Réactive en fonction de temps.....	96
Figure 4.11 Parties réelles et imaginaires de la tension du stator en fonction du temps..	96
Figure 4.12 Variation de la tension stator en fonction de temps.....	96
Figure.4.13 Variation du courant du stator en fonction de temps.....	97
Figure 4.14 Variation de la tension du rotor en fonction de temps.....	97
Figure 4.15 Zoom de la Figure 4-14 à 1s à 2s de la tension du stator en fonction du temps.....	97
Figure 4.16. Zoom de la Figure 4-13 à 1s à 2s La tension de commande d'entrée du rotor en fonction du temps.....	97
Figure 4.17 Schéma bloc du DSPC pour une GADA connectée au réseau.....	101
Figures 4.18. Les contrôles de puissance directe proposés.....	104
Figure 5.1 Principe de fonctionnement des phases de pompage pour stocker l'énergie et de turbinage pour produire de l'électricité	111
Figure 5.2 Principe de fonctionnement d'un CAES	111
Figure 5-3 Pile à combustible.....	115
Figure 5-4 Système de stockage inertiel.....	117
Figure 5.6 Diagramme de Ragone	119
Figure 5.5 Stockage magnétique (SMES)	120
Figure 5.7 Centrale inertielle de Beacon Power	123

Figure. 5-8. Système de stockage inertie	124
Figure 5.9 Système de production éolien avec stockage	125

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Gamme des puissances des aérogénérateurs.....	9
Tableau 3.1. Fréquence des harmoniques.....	56
Tableau 3.2. Coordonnées des vecteurs dans le plan et dans l'espace dit complexe ($E \equiv V_{dc}$)	62
Tableau 3.3. Comparaison MLI's ISVM/Naturelle.....	71
Tableau 5.1. Comparaison entre les différentes technologies de batteries.....	113
Tableau 5.2. Synthèses des systèmes de stockage à grande échelle.....	115
Tableau 5.3. Estimation des valeurs d'investissement en fonction de la technologie.....	116

LISTE DES ACRONYMES ET SYMBOLES

Acronymes

GADA	Génératrice asynchrone double alimentée
MADA	Moteur asynchrone double alimenté
GAS	Génératrice asynchrone
<i>DFIG</i>	<i>Doubly Fed Induction Generator</i>
<i>FOC</i>	<i>Field Oriented Control</i>
<i>DTC</i>	<i>Direct Torque Control</i>
<i>MRAS</i>	<i>Model Reference Adjustable System</i>
<i>TOF</i>	<i>Torque Optimisation Factor</i>
SVM	Modulation vectorielle de l'espace
<i>ISVM</i>	<i>Maginary Space-Vector Modulation</i>
BF	Boucle fermée
<i>SVC</i>	Static VAR Compensator
<i>TCR</i>	Thyristor Controlled Reactor
<i>TSC</i>	Thyristor Switched Capacitors
DPC	Contrôle de puissance direct
<i>SDPC</i>	Contrôle de puissance apparente directe
EnR	Énergies renouvelables
<i>CAES</i>	Compressed Air Energy Storage
<i>UPS</i>	Uninterruptible Power Supply
<i>AVR</i>	Automatic Voltage Regulator:

Symbole

V, V_v	Vitesse du vent
\vec{V}_{rot}	Composante du vent due à la rotation de l'aérogénérateur
β	L'angle de calage des pales
i	L'angle d'incidence
dE_c	L'énergie cinétique infinitésimale
dx	Longueur d'une colonne d'air
S	Surface balayer par le rotor de l'éolienne
ρ	Masse volumique de l'air
P_m	Puissance extraite du volume d'air en mouvement
V_1, V_2	Vitesses respectivement en amont et en aval de l'éolienne
V_m	Vitesse moyenne
P_{mt}	la puissance totale théoriquement extractible d'un volume d'air en mouvement
C_p	Coefficient de puissance
λ	Vitesse spécifique
R	Rayon de la surface balayée
Ω_t	Vitesse de rotation à l'extrémité des pales de la turbine
η_{mec}, η_g	Rendements respectivement de la mécanique et du générateur
K	Rapport du multiplicateur de vitesse
Ω_g	Vitesse à l'arbre du générateur
C_t	Couple de la turbine

C_g	Couple de la génératrice
C_{em}, C_e	Couple électromagnétique de la machine
R_s, R_r	Résistances au stator et au rotor par phase, respectivement.
V, I et Φ	Tension, courant et flux de chacune des armatures de la machine à Induction
l_s, l_R	Self inductances statorique et rotorique
m_s, m_R	Mutuelles statorique et rotorique
m_O	Mutuelle inter (S,R)
θ	Position
p	Nombre de paire de pôles
C_r	Couple résistant
\bar{x}	P haseur
$[\wedge]$	Vecteur espace de position à $\pm 120^\circ$.
L_s, L_R	Inductances cycliques propres du stator et du rotor
M	Inductance cyclique mutuelle stator–rotor.
R_s, R_R	Résistance d'une phase statorique et rotorique
g	Glissement
ϕ_s, ϕ_R	Flux du stator et du rotor
C	Capacité d'un condensateur
i_μ	Courant magnétisant de la machine
ϕ_μ	Flux de magnétisant de la machine
$l_{\sigma s}, L_{\sigma R}$	Inductances des flux de fuites au stator et au rotor
ω_s	Pulsation des grandeurs statoriques

ω_R	Pulsation des grandeurs rotorique
δ	Angle de charge
σ	Coefficient de dispersion
V_{mod}, V_{port}	Tensions maximales de la modulatrice et de la porteuse
V_{dc}	Tension du bus continu)
T	Période d'échantillonnage
α	Rapport cyclique
T_{ON}, T_{OFF}	Temps d'application de l'impulsion
m_i	Rapport de modulation
f_{pot}, f_{mod}	Fréquences de la modulatrice et de la porteuse
k, q, l, p et r	Entiers positifs
V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}	Tensions simples aux niveaux de la charge triphasée
S_A, S_B, S_C	Ordres de commutation d'un onduleur de trois niveaux
\vec{V}_S	Tension de référence au secteur1 d'un onduleur
T_1, T_2	Temps d'applications des vecteurs adjacents \vec{V}_1 et \vec{V}_2
T_0, T_7	Temps d'application des tensions nulles
$\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$	rapports cycliques
T_{ar}, T_{br} et T_{cr}	Temps d'application des impulsions adaptées aux gâchettes des IGBTs
T_{ga}, T_{gb} et T_{gc}	Temps de déclenchement des bras de l'onduleur
T_{eff}	Temps effectif
T_{offset}	Instant effectif
T_{ga}, T_{gb} et T_{gc}	Les temps de déclenchement des bras de l'onduleur

P_{ch}, Q_{ch}	Puissance active et réactive de la charge
$s. = \frac{d}{dt}$	L'opérateur de dérivation de Laplace
$j = \sqrt{-1}$	L'unité imaginaire
v_{Rd} et v_{Rq}	Tension rotorique dans le référentiel tournant
i_{Rd}, i_{Rq}	Courant rotorique dans le référentiel tournant
P_S, Q_S	Puissances active et réactive du stator de la GADA
ϕ_{Sd}, ϕ_{Sq}	Flux statorique dans le référentiel tournant
I-BF	Composantes du courant du rotor en boucle fermés
P-BF	Puissances en boucle fermés
$\Delta\bar{v}_S$ et $\Delta\bar{v}_R$	Chutes de tension du stator et du rotor
\bar{T}_S	Fonction de transfert complexe
β	Temps de 'magnétisant' du rotor constant
T_R	Constante du rotor
$\bar{d}(s)$	Terme de perturbation complexe
\bar{L}, \bar{K}	Gains complexes
\bar{w}	Tension de commande du rotor
k_p, k_i	Gains du PI
\bar{S}	Puissance apparente
ω_S	Pulsation des grandeurs électriques statoriques
θ_S	Angle électrique relatif à la pulsation statorique
θ_R	Angle électrique des grandeurs du bobinage rotorique
ω_R	Pulsation des grandeurs du bobinage rotorique

δ	L'angle de charge
<i>PDC</i>	Profondeur de décharge
SOC	L'état de charge
W_{stock}	Énergie stockée
W_{max}	Capacité énergétique

INTRODUCTION GÉNÉRALE

0.1 Contexte éolien

Actuellement, les énergies renouvelables n'entrent qu'à hauteur de 20 % environ dans la production mondiale d'électricité. Bien qu'énergie finale propre par excellence, il apparaît donc de façon avérée que l'électricité contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ressources non renouvelables (combustibles fossiles et uranium). C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part des ressources renouvelables pour la production d'électricité. Dans ce contexte, la production par des aérogénérateurs est en train de jouer un rôle de première importance. Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en électricité ou en d'autres formes d'énergie. La production d'énergie éolienne a connu une croissance extraordinaire au cours de la dernière décennie, car cette énergie est reconnue comme étant un moyen écologique et économique de produire de l'électricité.

0.2 Objectif du Travail : Commande des Génératrices Asynchrones

Les systèmes complexes de génération d'électricité par les moyens d'entraînement éolien à vitesse variable sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable. Du point de vue électrotechnique, il est important de disposer de différentes technologies de générateurs telles que les machines synchrones, les machines à aimants permanents et les machines asynchrones. Particulièrement, La machine asynchrone à cage (GAS) est la plus convoitée pour ses qualités connues (coût, robustesse, maintenance aisée). Mais si elle est connectée directement au réseau, ce dernier impose la fréquence et dans ce cas la vitesse d'entraînement doit être constant[1-2]. De plus, si on utilise un convertisseur à son stator, on trouve que la plage de variation de vitesse est plus limitée.

Actuellement, le système éolien à vitesse variable à base de machine asynchrone double alimentée est le plus utilisé dans les fermes éoliennes. La génératrice asynchrone double alimentée (GADA) offre plusieurs avantages : un très bon rendement énergétique, une bonne robustesse ainsi qu'une facilité d'exploitation et de commande. En plus, elle permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques. Grâce à ces avantages, cette machine a suscité beaucoup de curiosité de la part des chercheurs qui ont essayé de développer des stratégies pour exploiter au mieux ses points forts.

L'aérogénérateur à vitesse variable à base de la machine asynchrone à rotor bobiné est très exploitée surtout en génération dans les deux réseaux insulaire et interconnecté. L'idée maîtresse du travail mené dans cette thèse est d'utiliser les possibilités offertes par la vitesse variable pour travailler à des points de rendement maximaux tout en contrôlant le transfert de puissance entre le stator et le réseau par des commandes découplées des puissances active et réactive.

Parmi ces commandes, les commandes dites vectorielles par orientation du flux (statorique ou rotoriques), mais qui souffrent de la maîtrise des régimes transitoires en terme de puissance injectées au réseau, et en outre des variations paramétriques de la machine. Cependant, il existe des commandes modernes qui s'adaptent mieux aux exigences du contrôle des puissances générées et qui sont moins sensibles et robustes. Ces commandes s'inspirent de l'approche de la stratégie du contrôle directe du couple modifiée (DTC), incorporant la modulation vectorielle de l'espace (SVM) utilisée pour obtenir une fréquence de commutation constante [3].

De cette inspiration des commandes directes, des nouvelles commandes ont pu être développées dans cette thèse, en l'occurrence les commandes sous formulation complexe

utilisant d'emblée la puissance apparente d'une GADA. La première étant réalisée par retour d'état complexe et peut être considérée comme une commande robuste vis-à-vis des variations des paramètres du modèle de la machine. La seconde est celle inspirée d'une DTC où le contrôle des puissances active et réactive est consigné sous sa forme apparente ou S-Puissance qui s'effectuera à travers la modulation une SVM particulière appelée *ISVM (Imaginary Space-Vector Modulation)* en substituant les contrôleurs à hystérésis conventionnels. La technique *ISVM* permet de bénéficier de deux avantages tels que le peu de temps de calcul pour sa mise en œuvre numérique et pour sa fréquence de commutation fixe de l'onduleur [4].

0.3 Structure de la Thèse

Le présent travail est structuré en cinq chapitres:

- Le premier chapitre présente une description du gisement éolien et ses différentes chaînes de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. On exposera les différentes associations machines électriques – convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne
- Le deuxième chapitre traite de la modélisation à formulation complexe d'une machine asynchrone simple et double alimentée dont les bénéfices sont impactés sur le temps de calcul requis aussi bien en commande qu'en observation.
- Le troisième présente les aspects de modélisation et d'algorithmique des techniques MLI, et particulièrement la technique *ISVM*, la dite technique permet de dégager une MLI ayant les performances acquises d'une SVM avec la particularité d'être aisément implantable en temps réel, notamment en expérimental, avec un minimum de calcul.
- Le quatrième chapitre, expose dans une première partie des commandes conventionnelles scalaires et vectorielles d'une génératrice asynchrone sous ces deux versions simple et double alimentée. La version scalaire pour le contrôle de la tension d'une génératrice asynchrone simple alimentée en modulant la puissance réactive d'une batterie des condensateurs. La seconde version pour le contrôle d'une génératrice asynchrone double alimentée (GADA), dont le stator est connecté au réseau. La deuxième partie de ce chapitre 4 traite de deux nouvelles stratégies de commandes robustes d'une GADA. La première commande est celle donnée par retour d'état complexe pour une GADA alimentant un site isolé. La seconde commande appelée la commande "S-Puissance" contrôlant directement la puissance apparente au niveau du stator d'une génératrice asynchrone double alimentée connectée sur un réseau. Ces deux stratégies de commandes sous leur formulation complexe préconisent une implantation résolument réduite

avec une robustesse accrue contre les variations paramétriques du modèle de la machine par rapport aux commandes vectorielles.

- Le cinquième chapitre, présente un état de l’art sur le stockage d’énergie en suscitant à mettre en relief les avantages et inconvénients des différentes technologies employées pour élucider notamment les différentes problématiques occasionnées. Le rôle de ce processus de stockage est de transformer les sources des énergies renouvelables au fait d’une forme d’énergie vers une autre que l’on peut garder et préserver provisoirement pour pouvoir les réutiliser électriquement. Ainsi, les énergies renouvelables peuvent devenir compétitives par rapport aux sources d’énergie fossile.

- Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale où il sera exposé un bilan et les perspectives à venir.

0.4 Bibliographie

- [1] Philippe Dunsky (Centre Hélios), “Les nouvelles filières d’énergie renouvelable (rapport no 3) ”, pour la Commission de l’économie et du travail de l’Assemblée nationale du Québec, mars 1997, 44 pages
- [2] N. R. N. Idris and A. H. M. Yatim, “Direct torque control of induction machines with constant switching frequency and reduced torque ripple,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 4, pp. 758–767, Aug. 2004
- [3] L. Xu and P. Cartwright, Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 3, pp. 750–758, Sep. 2006
- [4] N. Mekkaoui, M-S. Naït-saïd, “Direct S-power control for a doubly fed induction generator”, *Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg.* Vol. 62, 4, pp. 365–370, Bucarest, 2017

Chapitre 1

SURVOL SUR L'AÉROGÉNÉRATEUR ASYNCHRONE VIA UNE ÉOLIENNE

1.1 Introduction

La quasi-totalité des activités contemporaines est devenue fortement liée à l'usage accru de l'énergie électrique couvrant pratiquement tous les secteurs allant du domestique, voire nos batterie de smart-phones, au spatial. Dès lors, cette colossale demande en énergie électrique pourrait conduire à son épuisement (!) si l'on se contenterait uniquement de sa production via les ressources fossiles (Pétrole, Charbon, Uranium, etc.), cela étant évidemment avec un prix exorbitant sur l'impact de l'environnement et des changements climatiques de la biosphère terrestre [1]. Ainsi, il ne revient pas, à ce niveau, de démontrer de combien est l'importance de l'apport de la production de cette noble énergie électrique via les énergies renouvelables, durables et propres entre autres *le solaire* et *l'éolien* [2-4]. Ce dernier fait l'objectif du présent mémoire versé sur les aspects du contrôle de l'énergie électrique, produite via un aérogénérateur, et envoyée vers le réseau.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. L'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de

grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [5-7].

Le présent chapitre, à connotation bibliographique, est donné pour élucider certains aspects sur la production de l'énergie électrique via l'énergie éolienne. Cela étant en partant en bref de l'historique, des statistiques qui lui sont consignées, des différentes structures technologiques (verticales, horizontales, à vitesses fixe ou variable) qui lui sont dévolues et enfin des principes théoriques fondamentaux sur lesquelles des aspects de développement et de modélisation sont à appréhender [1-6].

Du point de vue électrotechnique, on accorde une importance particulière à la machine à induction double alimentée, considérée comme l'élément clé de la conversion d'énergie, dans la production de l'énergie électrique via un aérogénérateur-éolien. Ce point de vue est catégoriquement formulé par ses caractéristiques intéressantes de disposer de deux armatures à trois fréquences différentes linéairement combinées. En effet, la première armature, le stator, est connectable à un réseau de fréquence fixe quant à la deuxième, le rotor, est commandable et/ou contrôlable électriquement en fréquence variable via un convertisseur de puissance relativement faible tout en ménageant l'autre fréquence mécanique de l'arbre du rotor liée à la variation du vent, d'où parvient la puissance mécanique d'entraînement de l'aérogénérateur [8-11].

1.2 Historique de l'éolien

Dans le tout dernier siècle écoulé, la crise pétrolière de 1973 avait longuement contribué à éveiller l'intérêt, dans plusieurs pays développés, à disposer d'une substitution des énergies conventionnelles par l'emploi des énergies dites renouvelables, entre autre l'éolienne. Ainsi cela à amorcer des politiques conduisant plusieurs de ces pays à s'investir pour améliorer la technologie des aérogénérateurs.

Au fait, l'exploitation du vent pour en faire une énergie mécanique rudimentaire est une technologie très ancienne datant depuis l'antiquité quoique parfois non suffisamment rénovée et adaptée et par la même oubliée [12]. Mais plutard, à partir du V^e siècle, les premiers aéromoteurs en Asie et en Egypte, des machines à axe vertical, ont été utilisés dans les moulins à axe horizontal. Les premières éoliennes, construites en Europe remontaient au XII siècle. Composées de quatre pales, elles tournaient autour d'un axe horizontal pour faire avancer les bateaux, pomper de l'eau, moudre du grain ou scier du bois... Au XX siècle, durant les années 1930-1960, les recherches aérodynamiques importantes pour l'aéronautique permirent aux moteurs

éoliens de faire des progrès sensibles, notamment au Danemark et en Allemagne [6-7]. A cette fin de période, le coût du kWh thermique produit à partir des énergies primaires fossiles a largement concurrencé économiquement l'attrait au développement du marché l'éolien. L'histoire des éoliennes produisant les dizaines de kW reprenait à partir des années 1980, après le premier choc pétrolier de 1973. En 1991, la première ferme éolienne de type 'offshore' avec une capacité de 4,95MW a été installée à Vindeby au Danemark. Les éoliennes verraient leur ressort de nouveau qu'en décembre 1997 lors de la conférence de Kyoto qui déboucha sur des accords où une partie des pays industrialisés s'engageraient à réduire leur émission de gaz à effet de serre jusqu'à l'horizon 2010 [2-8].

L'amélioration des performances des aérogénérateurs moyennant les convertisseurs de l'électronique de puissance a conduit à l'injection de l'énergie cinétique du vent transcendue en électrique dans les réseaux. Les premières éoliennes utilisant une génératrice asynchrone, liée aux pales par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse fonctionnant à vitesse fixe, sont directement reliées au réseau (pas d'interface électronique), c'est une technologie employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent vers la vitesse variable en utilisant la machine à induction double alimentée pour maximiser l'injection de puissance captée du vent vers le réseau [10-11], [13-14].

1.3 Perspectives de l'éolien dans le monde et en Algérie

Comparativement aux énergies traditionnelles, la production de l'énergie électrique par l'éolien devient compétitive grâce ses qualités de disponibilité, de propreté (non polluante), de durabilité, de fiabilité et enfin de sécurité. Récemment, l'énergie éolienne connaît une grande croissance et une attraction particulière des investisseurs dans le monde. Au demeurant, les réacteurs nucléaires devraient être en fin d'activité selon *l'International Atomic Energy Agency* à partir de 2008. La figure (1.1) matérialise une idée sur les puissances éoliennes installées dans le monde entre deux années de productions consécutives, déjà en 2014, il est noté que la Chine surclasse les USA. En perspectives, l'énergie éolienne aurait un poids de contribuer en 2020 à au moins 12% de la consommation électrique mondiale [2-6].

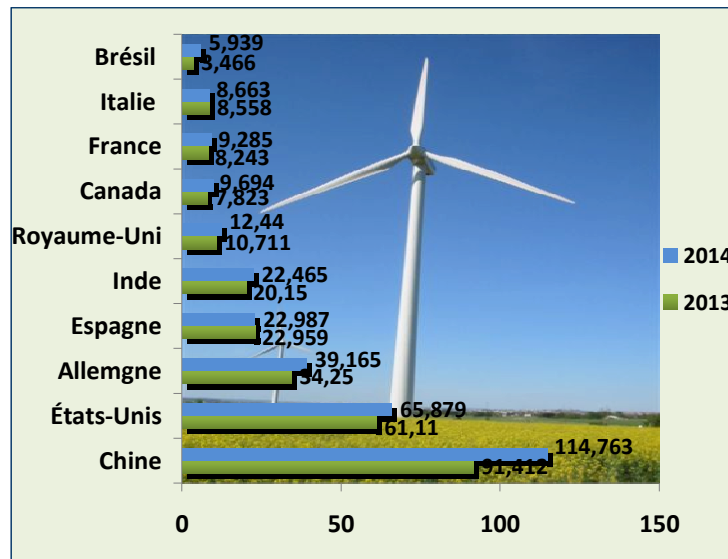


Figure 1.1 Les dix premiers producteurs de l'énergie d'éolienne dans le monde (MW).

L'Algérie, présente un potentiel éolien considérable, selon les estimations du centre de développement des énergies renouvelables (CDER), pourtant les ressources du vent ont à une topographie différente d'un endroit à autre. Un potentiel éolien notable peut être exploité pour la production d'énergie électrique particulièrement dans les régions situées au sud-ouest du Sahara, dont les vents peuvent dépasser respectivement de 6m/s et 7m /s, dans les région de Tindouf et d'Adrar. Deux zones sur le littoral, trois zones sur les hauts plateaux, ont été notamment identifiées comme zones ventées et pourraient être susceptibles de recevoir des installations éoliennes [15-16], voir figure 1.2.

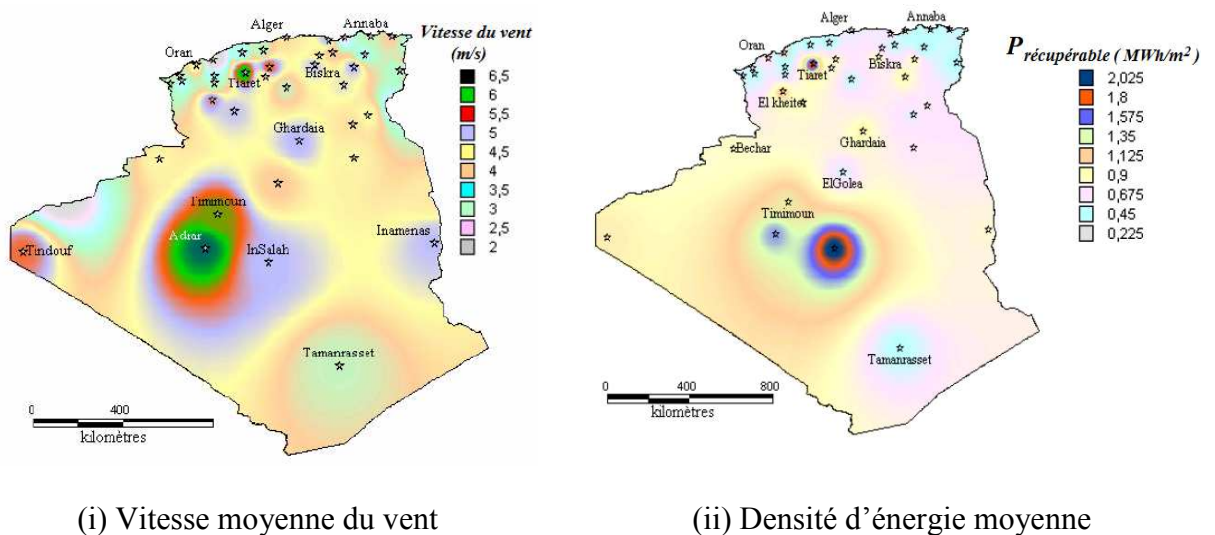


Figure 1.2. Carte annuelle d'Algérie de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) [15]

1.4 Description d'un système de turbine éolienne

1.4.1 Types des turbines éoliens

Ils sont classés selon les critères suivants [8-9]. :

- Gammes de puissances (voir tableau ci-après, puissances à titre indicatif)
- Axe vertical (voir Fig. 1.3) ou horizontal (voir Fig. 1.4), question performances, les verticales sont les plus indiquées.
- Mode de fonctionnement et vitesse fixe ou variable
- Emplacement : 'Onshore' (terrestre), 'Offshore' (naval)

Gamme des Puissances	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite puissance	moins de 12 m	moins de 40 kW
Moyenne puissance	12 m à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande puissance	46 m et plus	1 MW

Tableau 1.1: Tableau gamme des puissances des aérogénérateurs



(i) Turbine Darrieus

(ii) Turbine Darrieus de type H
Savonius

(iii) Turbine

Figure 1.3 Éoliennes à axe vertical[8-9].



(i) Éolienne bipale

(ii) Éolienne tripale

(iii) Éolienne multipale

Figure 1.4 Éoliennes à axe horizontal [8-9].

1.4.2 Synoptique global du système éolien

Ce système est illustré sur la figure 1.5 donnée ci-après. L'éolienne, incarnée par la turbine, convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique entraînant l'arbre de la machine électrique fonctionnant en générateur pour produire l'électricité, et qui via un convertisseur, généralement à deux étages de conversion, est injectée au réseau ou stockée dans des batteries. Ainsi, la puissance électrique débitée moyennant ce système éolien s'accroît en fonction de l'élévation de la vitesse du vent [8-9].

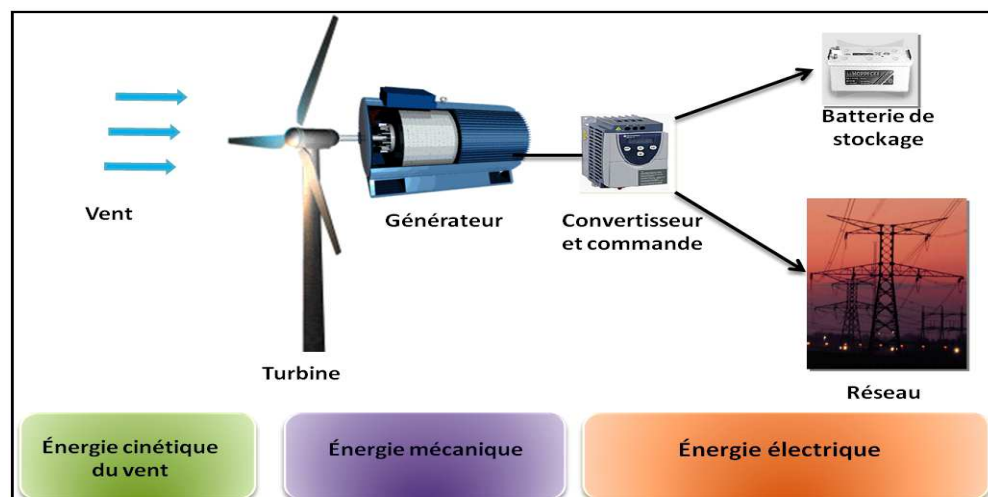


Figure 1.5. Synoptique du système aérogénérateur éolien.

1.4.3 Présentation d'une turbine éolienne à axe horizontal

Elle est distinguée par trois éléments principaux, le rotor, la nacelle et la tour, illustrés sur la figure (1.6), en outre, il sera donnée ci-après les définitions des différents éléments qui la compose [8-9], [13-14], [17-18].

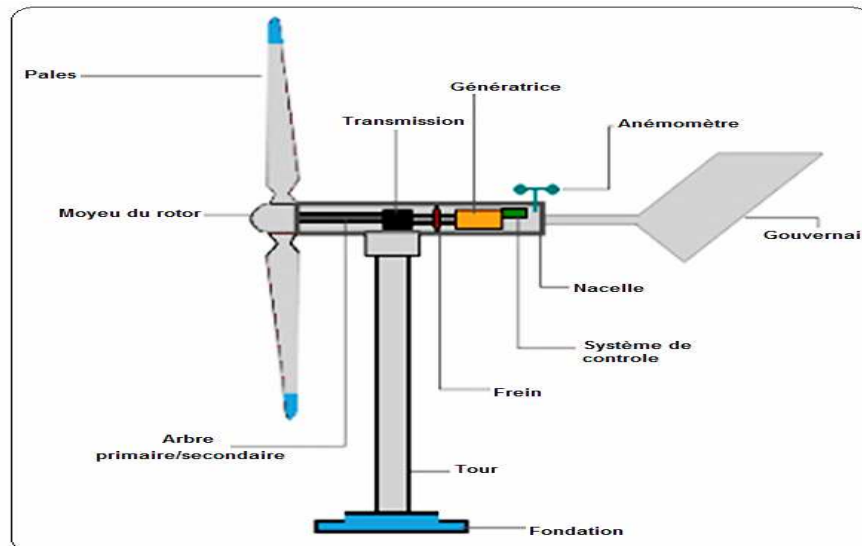


Figure 1.6 Éléments d'une turbine éolienne à axe horizontal [8-9]

- (i) **Pales** : Élément clé captant la cinétique du vent pour la transférer en mécanique au moyeu du rotor. Pour des considérations de limitation des bruits et des vibrations, actuellement, la plus part des installations sont munies du système tripale, offrant un compromis coût–efficacité.
- (ii) **Moyeu**: Organe portant les pales, entièrement moulé (aucune soudure) pour supporter les efforts aux transitoires (démarrage de l'éolienne, brusques changements de vitesses du vent).
- (iii) **Nacelle**: Coffret se trouvant en haut du mât pour contenir et protéger les différents éléments de l'éolienne (transmission, générateur, système de contrôle, etc.)
- (iv) **Transmission** : Arbre assemblant le moyeu au multiplicateur contenant un système hydraulique pour freinage aérodynamique en cas de besoin. Revenant un mouvement de rotation du moyeu pour entraîner le rotor du générateur électrique.
- (v) **Multiplicateur** : Élément adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur électrique. Pouvant être doté d'un frein mécanique à disque actionné pour urgence ou maintenance de l'éolienne.
- (vi) **Frein** : Servant à stopper l'éolienne pour urgence ou maintenance. Souvent, une éolienne est enclenchée à partir de 4 m/s et est arrêtée autour de 25m/s,
- (vii) **Générateur électrique** : Pouvant être générateur DC (continu) ou AC (alternatif) et transformant l'énergie mécanique en énergie électrique. Un ensemble convertisseur de l'électronique puissance pourrait lui être associé.
- (viii) **Système de refroidissement** : Comprenant un ventilateur électrique pour le refroidissement du générateur et un refroidisseur à l'huile (ou à eau) pour le multiplicateur [3].

(ix) **Système de contrôle** : Contrôlant au moyen d'un moteur électrique le mécanisme d'orientation et observant le fonctionnement de l'éolienne et commandant son arrêt en cas de défaillance

(x) **Anémomètre** : Mesurant la vitesse du vent transmise au système de contrôle.

(xi) **Gouvernail** : Servant à maintenir le rotor de l'éolienne dans l'axe horizontal face au vent pour soutirer le maximum d'énergie. Utilisé pour les petites éoliennes, quant aux grandes il donnera une information sur la direction du vent au système de contrôle pour orienter la nacelle en face du vent moyennant un moteur.

(xii) **Tour (ou Mat)**: Son rôle est de supporter la nacelle pour la placer à une hauteur suffisante en contre partie pour bénéficier au maximum de l'énergie du vent

1.5 Conversion cinétique–mécanique (C–M) de l'éolienne

1.5.1 Conversion C–M de la pale

La section longitudinale d'une pale d'un aérogénérateur est montrée sur la figure 1.7 [19], dont le vecteur de vitesse du vent \vec{V} lui est appliquée en face (surface de la pale en face du vent) comme indiqué sur cette figure. Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante du vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est constituée par \vec{V}_{res} .

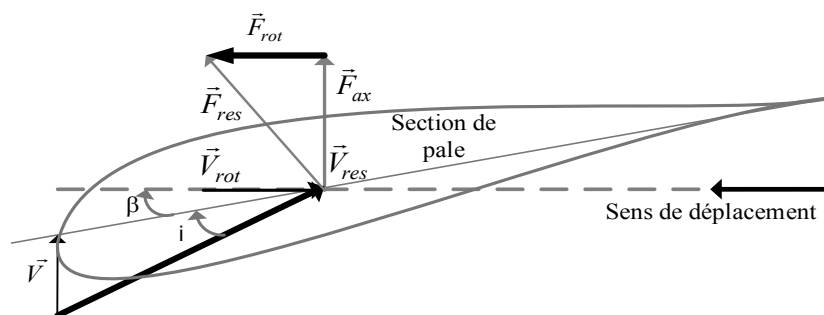


Figure 1.7. Forces inductives par le vent appliquées sur une pale

L'action du vent sur la pale induit une force se décomposant en deux poussées, l'une axiale directement compensée par la réaction mécanique du mat, et l'autre rotative produisant le déplacement effectif de la pale. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse du vent nominale. Lorsque la vitesse du vent devient trop élevée ou si le générateur nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite

par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale à l'aide de l'angle de calage des pales ' β ' et selon l'angle d'incidence ' i ' [19].

Dimensionnée à une vitesse nominale du vent pour des performances nominales en terme de puissance, il devient nécessaire à l'éolienne d'en faire perdre une partie d'énergie supplémentaire contenue dans le vent en évitant son éventuel endommagement en cas de vitesses du vent trop élevées. Ainsi, deux manières différentes de contrôler la puissance extraite de la turbine à la valeur de la puissance nominale du générateur sont à présager [17-20]

(i) *Système de décrochage aérodynamique (Stall control) :*

Il est conçu pour façonner une géométrie de la pale pour lui donner un profil, en cas de vitesses du vent trop élevées, le décrochage aérodynamique en provoquant de la turbulence sur la partie de la pale qui n'est pas face au vent, (figure 1.8, ce qui empêche la portance d'agir sur le rotor. Ce système est utilisé généralement dans les éoliennes à vitesse fixe de petites puissances, et il a l'avantage d'éviter l'installation de pièces mobiles dans le rotor, donc il est plus simple et moins coûteux. L'inconvénient est qu'une telle régulation pose de grands défis à la conception aérodynamique des pales afin d'éviter l'apparition de vibrations par décrochage.

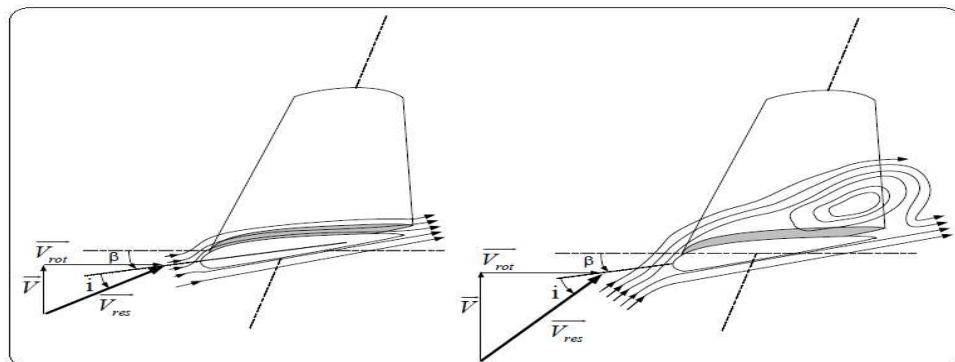


Figure 1.8 Flux d'air sur un profil de pale " stall control ".

(ii) *Commande d'orientation des pales (pitch control)*

Elle consiste à conserver la puissance de la turbine constante et égale à celle du nominal pour toute gamme de vitesses du vent comprise entre les vitesses nominale et maximale admissible par la machine. Cette régulation est obtenue en faisant varier l'angle de calage en pivotant les pales face aux fortes vitesses du vent par un dispositif de commande appelé « Pitch control » (Figure 1. 8). Ceci ajuste la portance des pales à la vitesse du vent et limite ainsi la puissance générée. À la vitesse maximale du vent, les pales atteignent leurs positions extrêmes et se disposent « en drapeau ». Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux

capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité. Des dispositifs technologiques de commande sont à pourvoir dans [18-20].

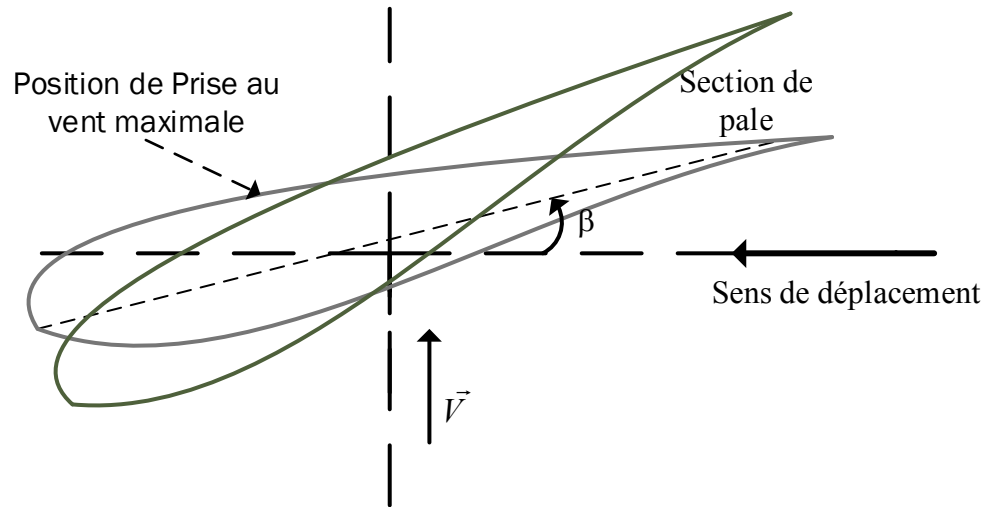


Figure 1.9. Variation de l'angle de calage d'une pale.

1.5.2 Conversion Cinétique–Puissance d'un tube à air

La turbine éolienne est un dispositif transformant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Selon la figure 1.10, l'énergie cinétique infinitésimale dE_c d'une colonne d'air de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ ($\rho=1.225\text{kg/m}^3$ pour l'air dans les conditions standards) et est animée d'une vitesse v par les relations ci-après aboutissant à la puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement [21]. La masse volumique peut varier en fonction de la pression atmosphérique. et la température

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S v^2 dx = \frac{1}{2} \rho S v^2 (v dt) \Rightarrow P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad 1-1$$

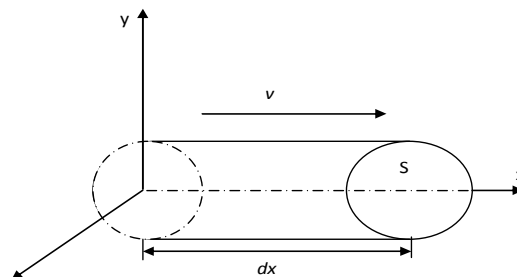


Figure 1.10. Colonne d'air animée d'une vitesse

1.5.3 Loi de Betz et coefficient de puissance

La figure 1.11 montrée ci-après illustre le passage d'un tube à air à travers les pales d'une éolienne horizontale où l'on distingue deux vitesses l'une en amont V_1 avec section S_1 (incidence du vent) et en aval V_2 avec section S_2 (sortie du vent).

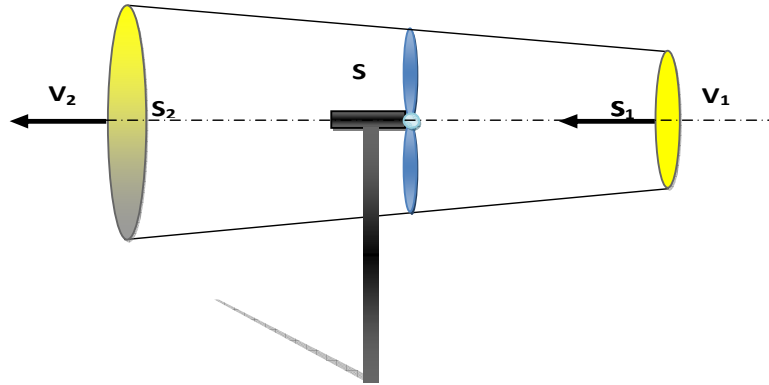


Figure 1.11 Tube du courant du vent autour d'une éolienne

Assumant qu'une vitesse non perturbée et moyenne du vent V_m est passante à travers la section S , dès lors les équations suivantes sont données ci-après où la masse considérée m est donnée en kg/seconde [21-22]

$$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2} \Rightarrow m = \rho S V_m = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \quad 1-2$$

La puissance réelle P_m extraite par le rotor à travers des pales entre incidence et sortie du vent s'exprime par [23]:

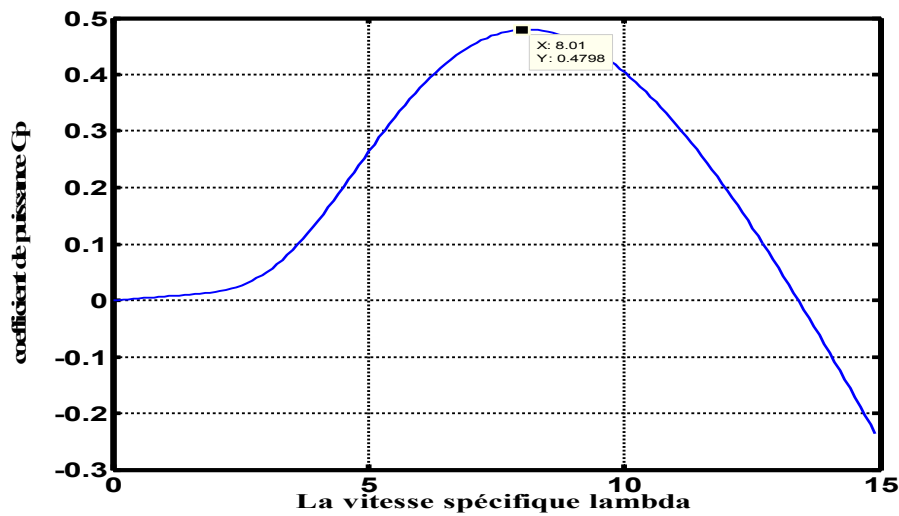


Figure 1.12. Caractéristique du coefficient de puissance

$$P_m = m \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \Rightarrow P_m = \rho S \frac{(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad 1-3$$

Il s'en déduit alors la puissance totale P_{mt} théoriquement disponible sur cette même surface S extraite sans diminution de vitesse du vent soit à la vitesse V_1 et donc le ratio (rapport) C_p , noté coefficient de puissance, entre P_m et P_{mt} comme ci-après [17-18],[23]. La caractéristique correspondante à l'équation du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique $\lambda = V_2/V_1$, $C_p = f(\lambda)$, est simulée sur figure 1.12.

$$P_{mt} = \rho S \frac{V_1^3}{2} \Rightarrow C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{1}{2}(1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \quad \text{où, } \lambda = \frac{V_2}{V_1} \quad 1-4$$

En se référant à la figure 1.11 donnée plus bas, la vitesse spécifique sera définie comme

$$\lambda = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\Omega_t R}{V} \quad 1-5$$

Où, R_t : Rayon de la surface balayée en [m] ; V : Vitesse du vent en [m/s] ; Ω_t : Vitesse de rotation à l'extrémité des pales de la turbine en [rad/s]. Par conséquent, le coefficient C_p est variable en fonction de V , de Ω_t , et de l'angle de calage des pales [17].

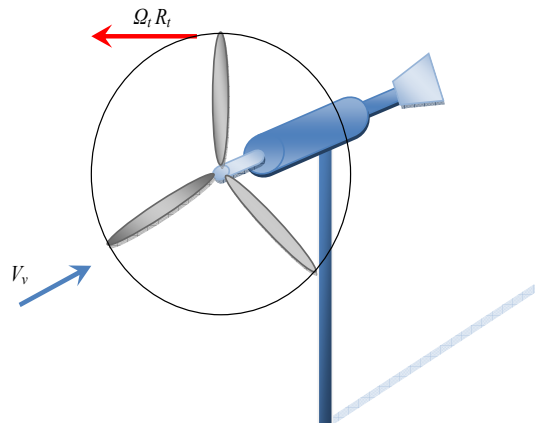


Figure 1.13 Illustration de la vitesse du vent V_v et la vitesse tangentielle $\Omega_t R_t$

Des relations précédentes, il s'en sort que le coefficient de puissance C_p présente un maximum théorique de (16/27 soit 0,593) appelé la limite de **Betz**, voir figure 1.12. Cela indique qu'une éolienne ne pourra jamais convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique à plus de (59%), et avec cette limite prescrite, chaque éolienne est alors définie par sa propre caractéristique $C_p = f(\lambda)$ comme montrée sur la figure 1.13 ci-après, [17-23]. La puissance produite à la sortie du générateur, à des rendements prêts, pourrait être estimée par le coefficient d'efficacité de l'éolienne, tel que [8], [11]

$$C_e = \eta_{mec} \eta_g C_p$$

1-6

Où : η_{mec} et η_g sont les rendements respectivement de la mécanique et du générateur. Notons que l'angle de calage β est fixé à sa valeur minimale, C_p prend sa valeur maximale égale à (0,5) correspondant à la valeur optimale de la vitesse spécifique.

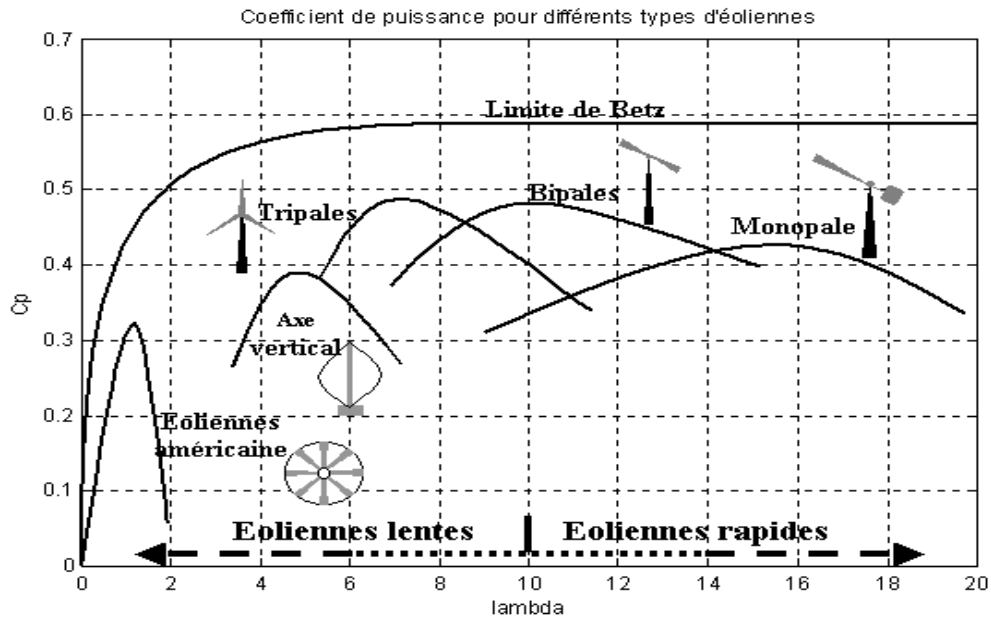


Figure 1.14. Illustration des différentes C_p - λ pour différents types d'éoliennes[22].

Comme montrées sur la figure 1.14, les éoliennes à marche lente sont équipées d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur forte inertie impose habituellement une limitation du diamètre d'environ 8 m. Leur C_p atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus abondantes, et pratiquement toutes vouées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs Mégawatts [22]. Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations liées à sa rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur C_p atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [13], [17-18].

La capture d'énergie aérodynamique de la turbine est une donnée spécifique pour chaque éolienne qui est caractérisée par son C_p exprimé en fonction des deux paramètres λ et β [23-25]. La figure 1.15 illustre cette la famille de courbes de la caractéristique $C_p=f(\lambda, \beta)$, où λ étant en

abscisse et β variant comme paramètre de réglage. Il vient, par conséquent, qu'il y aura plus de puissance pour les valeurs faibles de l'angle de calage β . Cette famille de courbes peuvent être modélisées mathématiquement en offrant une approche d'estimation appréciable des optimums de puissances [25-27].

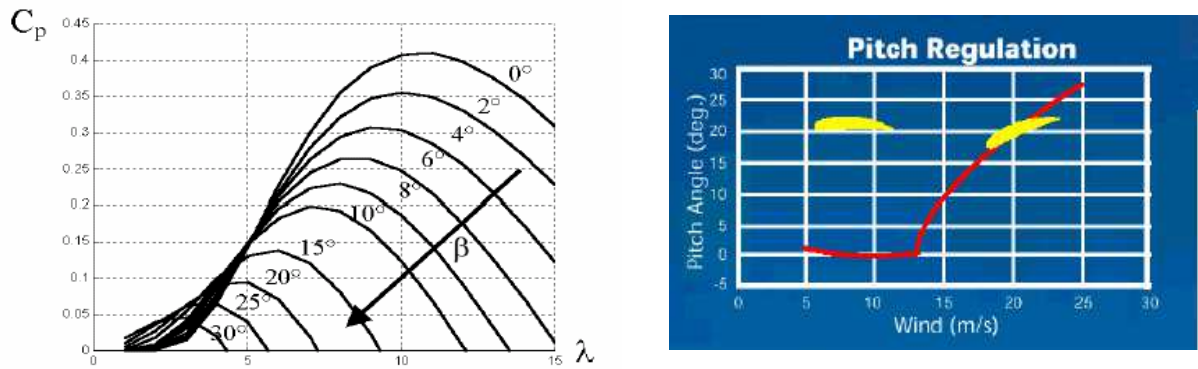


Figure 1.15 Famille courbes de la caractéristique $C_p=f(\lambda, \beta)$ [23-25].

1.6 Conversion électromécanique (EM)

1.6.1 Production d'énergie mécanique

Une combinaison succincte des équations précédentes permet de mettre en relief la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur comme suit :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p(\lambda) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \pi R^2 V_v^3 \quad \text{où, } \lambda = \frac{R \Omega_l}{V_v} \quad 1-7$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique P_{mg} disponible rapportée la vitesse à l'arbre du générateur, Ω_g (après multiplicateur), sera exprimée ci-dessous. Aussi, il sera permis d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible à l'arbre du générateur en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses du vent, voir figure 1.16. Il paraît clairement que si l'éolienne fonctionne à vitesse fixe, pour différentes incidences du vent, les maximums théoriques des puissances disponibles ne sont pas exploités

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{R \Omega_g}{K V_v} \right) \cdot \rho \pi R^2 V_v^3 \quad 1-8$$

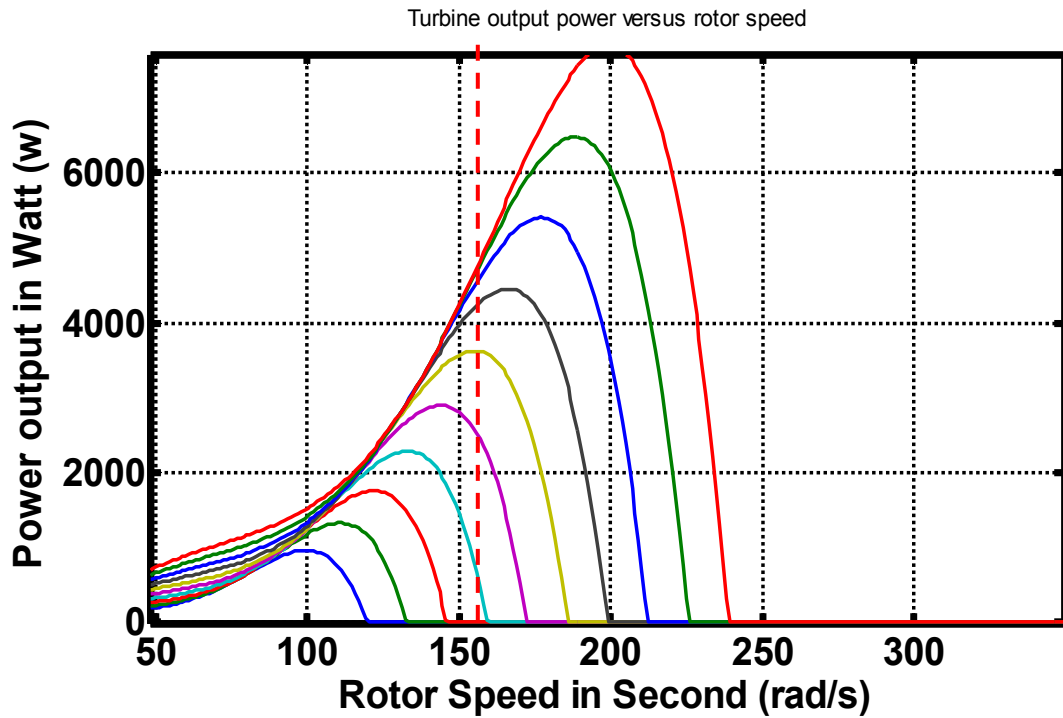


Figure 1.16 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Par conséquent, optimiser l'écoulement de puissance vers l'arbre du générateur par l'obtention des maximums théoriques pour chaque vitesse de vent, revient à fonctionner dans un intervalle de vitesse de rotation en utilisant un MPPT [26]. Selon le mode de fonctionnement, deux technologies d'éoliennes sont à faire valoir dans les sections suivantes, celle à vitesse fixe et l'autre à vitesse variable. La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad 1-9$$

La rotation de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent est dictée par la stratégie à trois zones de fonctionnement montrée dans la figure 1.17 La stratégie MPPT est fonctionnelle dans la zone II [26-28]. La zone I correspond aux vitesses du vent très faibles insuffisantes à l'entraînement de l'éolienne. La zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour ne pas l'endommager.

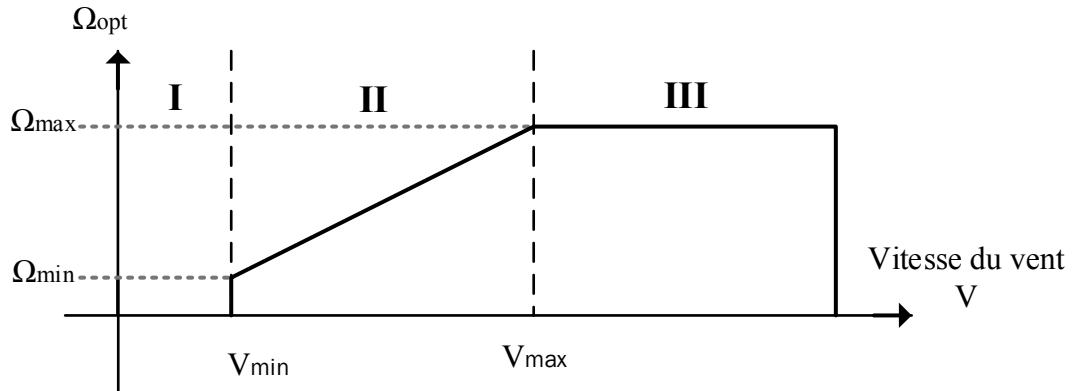


Figure 1.17. Stratégie optimale d'une éolienne à vitesse variable selon la vitesse du vent

En général, une génératrice à courant alternatif fournissant l'énergie électrique à fréquence variable ne peut être connectée directement sur un réseau, voire un site isolé. Ainsi une interface d'électronique de puissance à découplage de fréquence devient indispensable, voir figure 1.18. La fréquence variable de la génératrice est remise à zéro via un redresseur en alimentant un bus continu. A partir de ce dernier un onduleur ondule de nouveau l'énergie électrique, déjà en continu, à la fréquence demandée par le réseau où le site. Cette interface de découplage des fréquences est traditionnellement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors complètement découplé de la machine. La tension délivrée par l'onduleur n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques affectant sa qualité et propageant une pollution harmonique sur le réseau, ce qui nécessite plus d'appoint en terme de commande de façon à limiter les perturbations injectées sur le réseau via du moins un lissage (selfs) [27-29].

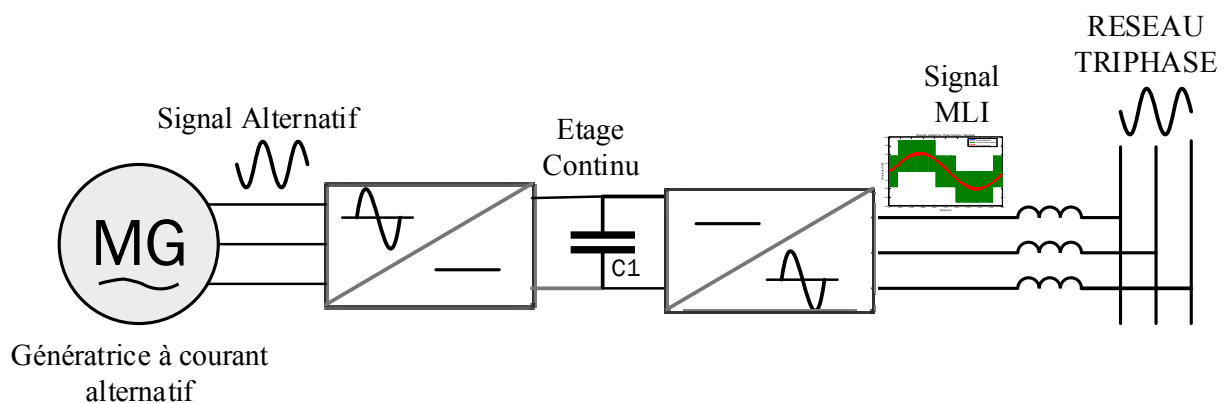


Figure 1.18 Connexion sur un réseau d'une génératrice AC à fréquence variable par interface électronique de puissance

De plus, les convertisseurs ainsi utilisés sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables. De là, il pourrait soutenir l'idée de la connexion directe du stator de la machine directement vers le réseau, telles que les génératrices asynchrones simple (GAS) et double alimentation (GADA)[10], [14], [18].

1.6.2 Production EM à éoliennes à vitesse fixe

À vitesse fixe, celles sont les premières éoliennes à avoir été conçues. L'aérogénérateur asynchrone simple alimentation, en fait partie de cette technologie (du type à cage d'écureuil), et qui est directement couplé au réseau à fréquence imposée sans intermédiaire de l'électronique de puissance, comme illustré sur la figure 1.19. Cela a constitué vraisemblablement un système simple et économique avec, toutefois, l'adjonction d'une batterie de condensateurs, appoint de réactif nécessaire, et un multiplicateur de vitesse lui assurant un fonctionnement hypersynchrone... Elle est exceptionnellement entraînée à des vitesses dépassant la vitesse synchrone, sans un excès de glissement qui peut être prohibitif pour le bobinage de la machine en y faisant circuler des courants très forts. En contre partie la simplicité de cette technologie à vitesse fixe ne permet pas d'exploiter la totalité de la puissance disponible pour les vitesses du vent élevées [23].

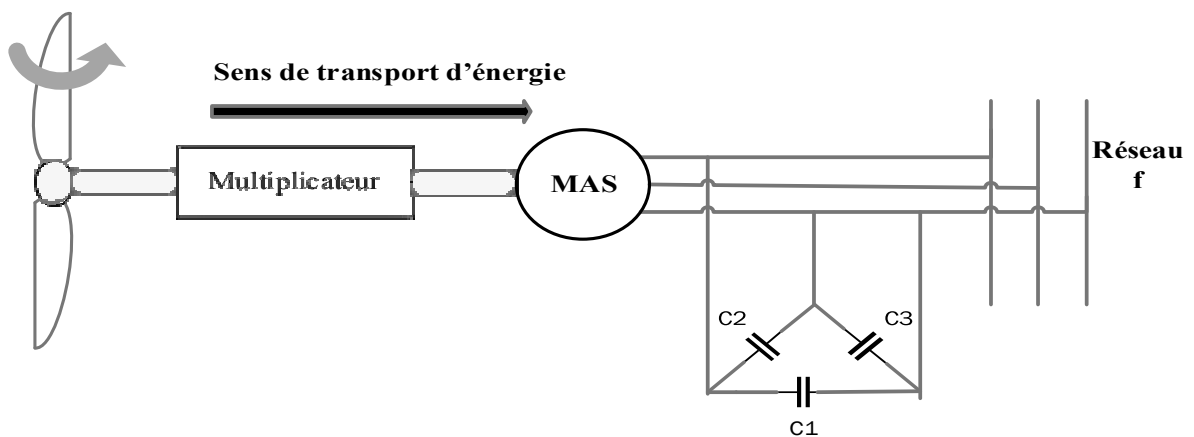


Figure 1.19 Aérogénérateur asynchrone simple alimentation (GAS)
Connectée au réseau [18-22]

1.6.3 Production EM à éoliennes à vitesse variable

En se référant à la figure précédente 1.14, il devient clair qu'un accroissement de la vitesse du vent et à une même vitesse de rotation, la puissance disponible s'accroît. Il est d'autant plus bénéfique pour extraire le maximum de puissance d'augmenter simultanément la vitesse de la turbine lorsque la vitesse du vent s'accroît. Ainsi, il devient intéressant de rendre la vitesse

mécanique du générateur variable en fonction de la vitesse du vent pour extraction du maximum de la puissance disponible. Ce faisant est, aujourd'hui, possible par les techniques d'extraction maximale de puissance, MPPT (Maximum Power Point Tracking) consistant à ajuster le couple électromagnétique du générateur à celui de sa référence qui est déduite d'un asservissement émanant de l'écart de vitesses de rotation, entre celle mécanique liée au générateur et celle de référence optimale liée à la turbine, en regard de la vitesse du vent captée [18], [22],[24].

C'est cette raison d'extraction d'énergie de l'éolienne qui fait que les aérogénérateurs à vitesse variable, à l'instar du type asynchrone à double alimentation, GADA, illustrée sur les figures 1.20-a et 1-20-b, sont de plus en plus convoités quoiqu'ils nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau, ou bien la charge, afin de contrôler les grandeurs électriques. Un des avantages de ce système GADA est la réduction de la taille du convertisseur redresseur-onduleur par rapport à la puissance nominale de la machine, dimensionné pour une fraction de sa puissance. Les deux principales structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont soit à base une machine asynchrone à rotor bobiné ou bien une machine synchrone à aimants permanents.

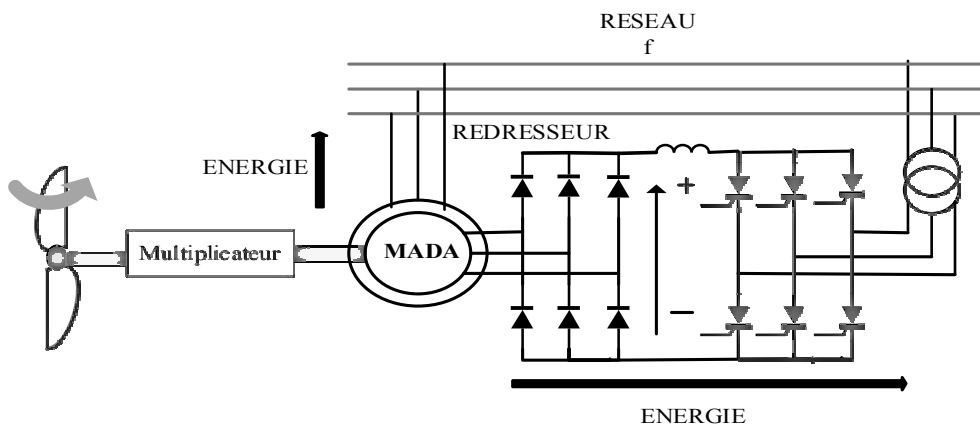


Figure 1.20-a Aérogénérateur asynchrone double alimentation (GADA) connectée au réseau
Energie rotor unidirectionnelle

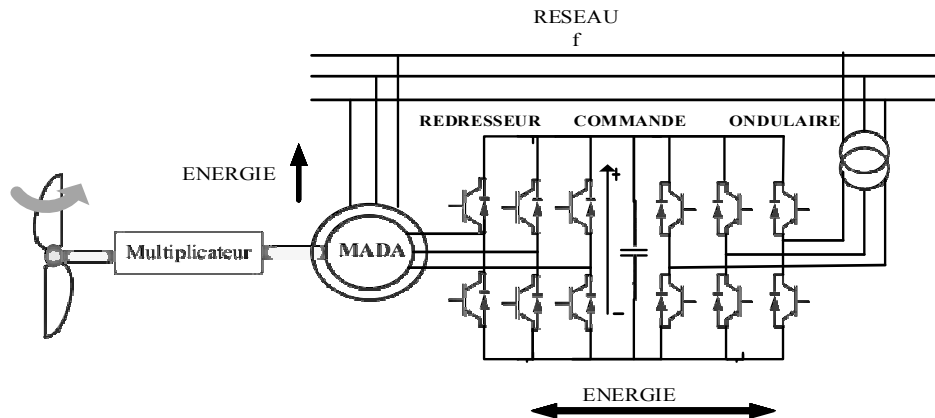


Figure 1.20-b Aérogénérateur asynchrone double alimentation (GADA) connectée au réseau
Energie rotor bidirectionnelle

La structure de la figure 1.20-a utilisant des thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme

La structure à base du générateur asynchrone double alimenté présentée dans la figure 1.20-b, a les mêmes caractéristiques que la celle des systèmes Scherbius avec cycloconvertisseur, voir système de Kramer, avec les possibilités d'injecter ou de récupérer l'énergie via le rotor. Les interrupteurs de l'électronique de puissance dans les convertisseurs utilisés sont commandable à l'ouverture et à la fermeture, à l'exemple des transistors IGBT, et qui permettent d'obtenir des tensions en Modulation de Largeur d'Impulsions suffisamment améliorées en terme de spectre fréquentiel du signal en rejetant à l'infini les premiers harmoniques (très modulant les signaux) non nuls vers les hautes fréquences.

Néanmoins, la présence de contacts glissants requière leur entretien et/ou leur changement périodiques. La conception de cette machine, la MADA/GADA, est conventionnellement de structure simple que celle de la machine brushless, avec un double bobinage accessible au stator, et un autre au rotor. Plusieurs études, confirmées par des réalisations industrielles, étendent la viabilité de ce dispositif à des systèmes éolien à vitesse variable. Ainsi, le fonctionnement bi-directionnel du convertisseur, connecté au rotor, autorise les modes de fonctionnement hyper et hypo-synchrone avec le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Si les glissements demeurent, autour du synchronisme, évidemment dans la zone stable naturelle de la caractéristique couple–vitesse de fonctionnement de GADA (inférieur à $\pm 30\%$), le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes seront à moins de 1% de cette puissance. Les modes de fonctionnement hypersynchrone permettent de produire de l'énergie du stator vers le réseau et notamment du rotor vers le réseau [22-24], [30]. Ce qui est une conséquence de produire plus de puissance que la nominale en plus d'actif avec un facteur de puissance de l'ensemble maintenu à l'unitaire. L'existence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des ingrédients de tension dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements.

La machine synchrone est classiquement utilisée en alternateur où la fréquence du stator est liée au synchronisme à la rotation de la roue polaire du rotor. En conséquence, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être strictement un sous-multiple de la pulsation des courants du stator. Dès lors entraîné par une éolienne à vitesse variable, l'alternateur risque de ne pas suivre la règle de la sous–multiplicité citée précédemment et le problème de son adaptation devient très sérieux à résoudre quant à sa connexion au réseau de fréquence imposé.

C'est ainsi que les interfaces de l'électronique de puissance (convertisseur =redresseur+onduleur) entre le stator de la machine et le réseau sont systématiquement utilisés pour créer le découplage de fréquences par le passage obligé de la fréquence nulle du bus continu après redressement et il s'en suit une ondulation vers l'alternatif du réseau à sa fréquence imposé (autonome ou non). Cela permettra bonnement d'autoriser un fonctionnement de l'alternateur à vitesse variable dans une large plage de variation [18-25].

1.6.4 Modèle d'une turbine éolienne

Ce modèle peut être établi à partir de la connaissance des caractéristiques de l'éolienne et du coefficient de puissance C_p . Il en découle la puissance mécanique disponible sur l'arbre de transmission, voir formule (1-7), et donc le couple d'entraînement comme c'est écrit ci-après.

$$\Gamma_T \equiv C_T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{1}{2\Omega} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} R^3 V_v^2 \quad 1-10$$

La figure 1.19 présente le synoptique global du modèle de l'éolienne [22-25], [30-31], on reconnaîtra les transferts donnée en cascade par l'input de la vitesse générant le coefficient de puissance (identifiant la turbine), ce dernier plus la vitesse du vent donne lieu au couple d'entraînement de la turbine. Celui-ci soustrait au couple de résistant, émanant du couple

électromagnétique de la machine, et par une intégration filtrée du premier ordre liée au moment d'inertie totale des éléments en rotation et du coefficient de frottement visqueux, se produit la vitesse de l'axe de la turbine et qui à son tour multipliée pour entraîner l'arbre du rotor de la génératrice asynchrone.

A partir de ce schéma synoptique on pourra s'inspirer à développer un simulateur de vent sans toutefois avoir l'usage de la machine électrique. L'application du coefficient du multiplicateur donnant la transmission de l'arbre de la turbine vers l'arbre de la machine permet en fait de dégager un MPPT avec un asservissement de vitesse tels que

$$\text{Si } \Omega_g = K \Omega_t \text{ et que } C_g = \frac{1}{K} C_t \quad 1-11$$

$$\text{Alors, } \Gamma_r \equiv K C_{em} = K C_{em_ref} = \text{Contrôleur} \left(\Omega_{ref_t} - \frac{\Omega_g}{K} \right) \quad 1-11a$$

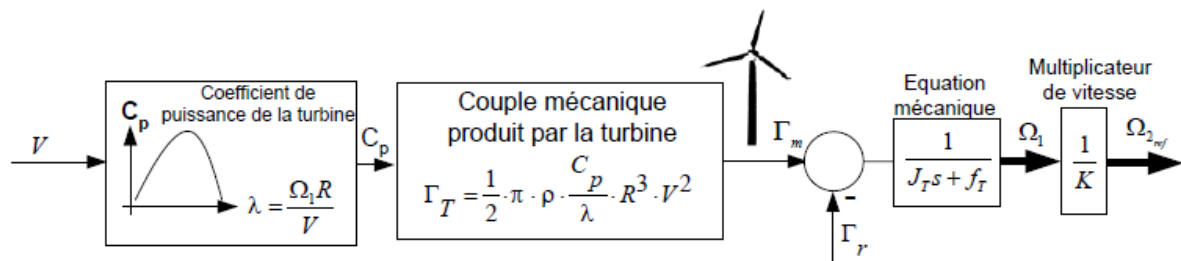


Figure 1.21. Synoptique global du modèle d'une turbine d'éolienne

1.6 Conclusion

Ce chapitre a retracé, dans un premier temps, un bref historique sur l'éolien suivi d'un exposé sur les statistiques de l'exploitation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité à travers le monde et particulièrement en Algérie en montrant les sites éoliens potentiels. Ensuite, une section a été sommairement réservée en montrant quelques technologies décrivant un système de turbine éolienne à usage aérogénérateur producteur d'électricité à conversion d'énergie « asynchrone » utilisant la machine à induction simple et double alimentée, dont l'intérêt est consenti pour la vitesse variable. L'apport de l'électronique de puissance en matière de convertisseur est alors primordial pour assurer en contrôle/commande et adaptation des flux de puissances ainsi en présence.

L'asynchronisme de la machine à induction est à proclamer pour ne point user beaucoup d'électronique de puissance comme le cas de la machine synchrone qui en

premier degré pose un problème d'adaptation dans le cas où celle-ci est appelée à être connecté sur un réseau dont la fréquence est imposée.

Pour saisir le fonctionnement de la turbine éolienne, quelques formulations mathématiques lui ont été consacrées. Il ressort qu'une éolienne est définie par son coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique et que cette relation diffère d'une turbine à une autre. L'orientation des pales de la turbine par l'angle de calage est assujettie, elle aussi, à optimiser l'extraction de cette puissance du vent, comme elle permet de ne point en extraire en cas des forts vents où la mise en drapeau de la turbine. Dès lors, des stratégies de commande, genre MPPT [32-33], doivent être observées pour pouvoir extraire le maximum de puissance du vent

En partant du fait que la machine à induction, dans son fonctionnement générateur, constitue l'élément clé de la conversion principale du cinétique-électrique, le chapitre suivant, lui sera entièrement consacré pour la modélisation de la dite machine à formulation complexe dont les bénéfices sont à faire valoir.

1.7 Références Bibliographiques

- [1] Site Internet : <http://pressespolytechniques.blog.tdg.ch/archive>, Importance d'Electricité polytechniques et universitaires romandes, 2017
- [2] Site Internet : [Wind Energy: An Overview - Wordpress.org](http://www.worldpress.org), <http://www.worldpress.org>
- [3] Site Internet : Rear Admiral John Trewby CB FEng, Chair of the working group, Royal Academy of Engineering, WIND ENERGY implications of large-scale deployment on the GB electricity system, April 2014, <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/wind-energy-implications-of-large-scale-deployment>
- [4] Site Internet : [Wind Energy Power & Solutions | GE Renewable Energy](http://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/turbines)
- [5] <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/turbines>
- [6] Site Internet AWEA (American Wind Energy Association), U.S. Wind Industry Third Quarter 2017 Market Report A product of AWEA Data Services Released October 25, 2017.
- [7] Site Internet EWEA (The European Wind Energy Association) <http://www.ewea.org/>
- [8] Retscreen - analyse de projets d'énergie éolienne, www.etscreen.net, 2018
- [9] Alois. Schaffarczyk ; ' Understanding wind power technology, theory, deployment and optimization ', Wiley, 2014.

- [10] L. Hanzo; 'Power Conversion and Control of Wind Energy systems'. Edition IEEE press, 2011
- [11] Roberto Cárdenas, et al, "Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 60, NO. 7, JULY 2013 pp. 2776-2798
- [12] Mustafa E. Amiryar * and Keith R. Pullen, "Review A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications, "Applied Sciences Journal, Academic Editor: Frede Blaabjerg, Appl. Sci. 2017, 7, 286; doi:10.3390/app7030286 pp.21/21, 16 March 2017,
- [13] Site internet : Energies renouvelables de la préhistoire à nos jours
- [14] www.astrolabium.be/IMG/pdf/dossier_pe_da_e_nergies.pdf,
- [15] G. Cuntz, "Eoliennes et aérogénérateurs", Guide de l'énergie éolienne, Edisud, Aix-en-Provence, [2001].
- [16] B. Multon, O. Gergaud, H Ben Ahmed, C. Nichita "État de l'Art dans les Aérogénérateurs Électriques", Lésir Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan paru mai en [2002].
- [17] N. Kasbadji Merzouk ; ' Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?'. Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, pp_6-7, 2008.
- [18] N. Kasbadji Merzouk ; 'Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination de profil vertical de la vitesse du vent en Algérie'. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 2006.
- [19] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.
- [20] F. Poitiers ; 'Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne '. Thèse de doctorat, Université de NANTES, France, 2003.
- [21] Bernard Multon, et al, 'Etat de l'art des aérogénérateurs'. L'electronique de puissance vecteur d'optimisation pour les 'énergies renouvelables, Ed. NOVELECT - ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, pp.97-154, 2002.
- [22] Venkata Yaramasu, et al 'High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies', Proceedings of the IEEE | Vol. 103, No. 5, pp: 740_788, May 2015.
- [23] Fernando D. Bianchi, Hernan De Battista, Ricardo J. Mantz; 'Wind Turbine Control Systems'. Edition Springer, 2007.

- [24] El Aimani, "Modélisation de Différentes Technologie d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension ", Thèse de doctorat, Université de Lille
- [25] B. Multon, O. Gergaud, H Ben Ahmed, C. Nichita "État de l'Art dans les Aérogénérateurs Électriques", Lésir Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan paru mai en [2002].
- [26] A. Mirecki, "Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Énergie Dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de doctorat, Université de Toulouse 5 Avril 2005.
- [27] Venkata Yaramasu, Bin Wu, Paresh C. Sen, Samir Kouro, and Mehdi Narimani, 'High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies', Proceedings of the IEEE | Vol. 103, No. 5, pp: 740_788, May 2015.
- [28] Abdullah M.A, Yatim A.H.M, Tan C.W, Saidur R. 'A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems', Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, pp:3220–3227, (2012).
- [29] Dahbi Abdeldjalil, Nait Said Nasreddine, Nait Said Mohamed Said, 'A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network', International Journal of Hydrogen Energy, (Elsevier). Vol 41; pp_9427–9442, April 2016.
- [30] https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/ELEC2670/SEM11/eolien_2014_2.pdf,
Energie éolienne Aspects électriques
- [31] Gwo-Ruey Yu; Chin-Wei Wu, Maximum power point tracking of wind energy systems for wide range operation, 2014 IEEE International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), pp. 143 – 148, 2014
- [32] Y. Alhassoun, "Etude et Mise en Œuvre de Machines à Aimantation Induite Fonctionnant à Haute Vitesse", Thèse de doctorat, Université de Toulouse 27 Mai 2005
- [33] Fernando D. Bianchi, et all, 'Wind Turbine Control Systems'. Edition Springer, 2007.
- [34] Abdullah M.A, Yatim A.H.M, Tan C.W, Saidur R. 'A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems', Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, pp:3220–3227, (2012).
- [35] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 2, pp. 486–494, Apr. 2006.

Chapitre 2

MODÉLISATION À FORMULATION COMPLEXE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE SIMPLE ET DOUBLE ALIMENTÉE

2-1 Introduction

De nos jours, la robustesse électromagnétique et le coût ont largement fait la réputation de l'usage accru des machines asynchrones, notamment plus commercialisées en moteur, et par la même en générateur avec les versions d'alimentation en tension simple et double. Ces dernières versions de fonctionnement peuvent, en grande partie, expliquer leur emploi dans les aérogénérateurs éoliens de différentes tailles. Les génératrices asynchrones double alimentation sont les plus indiquées pour l'éolien dont, l'entraînement est effectué à vitesse variable selon la vitesse du vent [1-3].

Le présent chapitre est dédié à la modélisation de la machine asynchrone sous sa formulation complexe dont les bénéfices sont impactés sur le temps de calcul requis aussi bien en commande qu'en observation. Il est conventionnel d'adopter le même modèle mathématique de la machine asynchrone bobiné aussi bien au stator qu'au rotor et aussi qu'il s'agisse d'une machine simple alimentation, généralement à cage d'écureuil, ou d'une machine double alimentée. Ainsi, quelque soit l'alimentation de cette machine, elle est considéré triphasée et bobinée au stator et au rotor. La transformation utilisant la notion de phaseur permet de rapporter un système de 3

bobines positionnées à $\pm 120^\circ$ à celui d'une seule bobine équivalente. Par la même, il devient aisé de passer du modèle triphasé, à deux armatures dimension 6×6 , au modèle sous formulation complexe à deux armatures de dimension 2×2 , comme il sera illustré ci-après. Aussi il devient aisé d'obtenir un modèle de la machine compact et simple à exploiter [4-8].

2.2 Modèle triphasé de la machine asynchrone

2.2.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation mathématique de la dite machine relève d'un système complexe. L'approche d'usage est éventuellement fondée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices liées à la physique et à la construction de la machine, ce qui permet d'avoir un modèle plus au moins cohérent et proche de la réalité, et enfin et surtout exploitable.

Les hypothèses simplificatrices prépondérantes sont comme suit. Le bobinage triphasé de chaque armature est parfaitement symétrique du point de vue magnétique et électrique représentable par 3 bobines équivalentes et à répartition sinusoïdale (*f.m.m.* sinusoïdale). Ils sont considérés négligeables : la saturation, l'effet de la température, le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau. Ces assertions signifient également l'additivité des flux, la constance des inductances propres, la variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre stator-rotor en fonction de la position du rotor [9-11].

2.2.2 Modèle de la machine asynchrone triphasée

Conformément aux hypothèses citées plus haut, le schéma du modèle triphasé d'une machine asynchrone est illustré sur la figure 2.1. Les phases rotoriques sont court-circuitées dans le cas d'une simple alimentation au stator. θ , étant la position absolue du rotor.

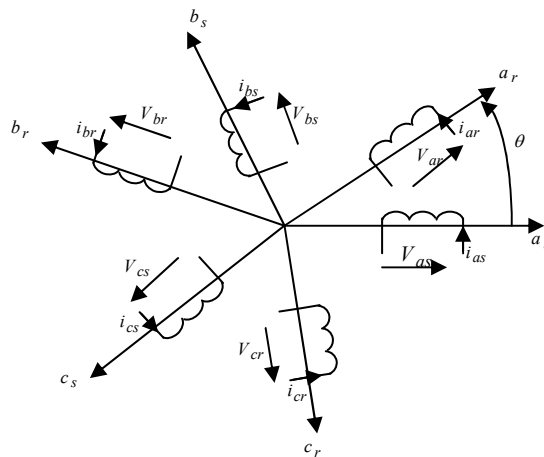


Figure 2.1. Schéma du modèle d'une MAS triphasée

La loi d'ohm généralisée relative à une simple bobine permet (chutes ohmique et inductive) écrire les équations des tensions triphasées au stator et au rotor matricielle ment comme suit, dont les indices « s » et « r » correspondent respectivement au stator et au rotor [5], [8-9].

$$\begin{cases} [V_S]_{3 \times 1} = R_S [I_S]_{3 \times 1} + \frac{d}{dt} [\Phi_S]_{3 \times 1} \\ [V_R]_{3 \times 1} = R_R [I_R]_{3 \times 1} + \frac{d}{dt} [\Phi_R]_{3 \times 1} \end{cases} \quad 2-1$$

Avec,

R_s et R_r représentant les résistances au stator et au rotor par phase, respectivement.

V , I et Φ dénotent les variables tension, courant et flux de chacune des armatures.

Où, les vecteurs correspondant sont (a, b, c : indices des phases quelque soit l'armature) tels que

$$\begin{aligned} [V_S]_{3 \times 1} &= [V_{Sa} \quad V_{Sb} \quad V_{Sc}]^t ; [V_R]_{3 \times 1} = [V_{Ra} \quad V_{Rb} \quad V_{Rc}]^t \\ [I_S]_{3 \times 1} &= [I_{Sa} \quad I_{Sb} \quad I_{Sc}]^t ; [I_R]_{3 \times 1} = [I_{Ra} \quad I_{Rb} \quad I_{Rc}]^t \\ [\Phi_S]_{3 \times 1} &= [\Phi_{Sa} \quad \Phi_{Sb} \quad \Phi_{Sc}]^t ; [\Phi_R]_{3 \times 1} = [\Phi_{Ra} \quad \Phi_{Rb} \quad \Phi_{Rc}]^t \end{aligned}$$

Et, les relations flux–courant sont données matricielle ment par

$$\begin{cases} [\Phi_S]_{3 \times 1} = [L_{SS}]_{3 \times 3} [I_S]_{3 \times 1} + [M_{SR}]_{3 \times 3} [I_R]_{3 \times 1} \\ [\Phi_R]_{3 \times 1} = [M_{RS}]_{3 \times 3} [I_S]_{3 \times 1} + [L_{RR}]_{3 \times 3} [I_R]_{3 \times 1} \end{cases} \quad 2-2$$

Avec, les matrices des inductances intra et inter armatures comme suit contenant les éléments self inductances intra (l_s , l_r) et mutuelles intra (m_s, m_r) et mutuelle inter (m_o) telles que

$$[L_{SS}]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} l_S & m_S & m_S \\ m_S & l_S & m_S \\ m_S & m_S & l_S \end{bmatrix} \quad 2-2-a$$

$$[L_{RR}]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} l_R & m_R & m_R \\ m_R & l_R & m_R \\ m_R & m_R & l_R \end{bmatrix} \quad 2-2-b$$

$$[M_{SR}]_{3 \times 3} = m_o \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 4\pi/3) \\ \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad 2-2-c$$

$$[M_{RS}]_{3 \times 3} = [M_{SR}]_{3 \times 3}^t \quad 2-2-d$$

Pour aboutir au modèle de la machine asynchrone globale marquant sa réversibilité de fonctionnement moteur-générateur, le modèle matriciel précédent est complété par l'adjonction des équations du couple électromagnétique C_e , de vitesse Ω et de position θ comme données ci-après. L'expression du couple est déduite du bilan de puissance et du principe de l'énergie et la co-énergie [9-11] .

$$C_e = \frac{1}{2} p \cdot \left[[I_S]_{3 \times 1}^t \quad [I_R]_{3 \times 1}^t \right]_{1 \times 6} \cdot [G]_{6 \times 6} \cdot \begin{bmatrix} [I_S]_{3 \times 1} \\ [I_R]_{3 \times 1} \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad 2-3$$

$$\text{Où, } [G]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} [0]_{3 \times 3} & \frac{d}{d\theta} [M_{SR}]_{3 \times 3} \\ \frac{d}{d\theta} [M_{RS}]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad 2-3-a$$

$$C_e = J \frac{d}{dt} \Omega + f\Omega + C_r \quad 2-4$$

$$\frac{d}{dt} \theta = p \cdot \Omega \quad 2-5$$

La réversibilité de la machine est concédée par le sens de l'écoulement des puissances actives. Le modèle décrit par les équations 2-1 à 2-5 est donné dans la convention « moteur ». Le cas générateur sera lorsque le couple résistant C_r devient une input d'entraînement positive par rapport au couple électromagnétique C_e qui devient à son tour une input négative prenant l'apparence d'un couple résistant causé par le débit des courants écoulés vers une charge électrique sur site isolé ou à travers un réseau.

2-3 Transformation Conformes

Le modèle établi précédemment (2-1 à 2-5) peut être décrit dans deux référentiels séparés liés respectivement au stator et au rotor, c'est le cas convenant à la machine double alimenté où les fréquences sont différentes. Les deux transformations requises, dans cette section, concernent le phaseur et la rotation. Ainsi le vecteur d'état de dimension 8×1 (2 fois triphasé +vitesse+position) du modèle précédent sera réduit par ces transformations à son équivalent complexe de dimension 4×1 . Ce qui est bénéfique pour le temps de calcul et pour l'identification

de ces paramètres au moyen des essais électrotechniques faisables. En outre, le référentiel unique de Park obtenu par une anti rotation accorde une interprétation appropriée des transferts des puissances entre les deux armatures [4-9],[12] .

2-3-1 Transformation Phaseur

Un vecteur triphasé dans le plan $[x]_{3 \times 1} = [X_a \ X_b \ X_c]^t$ peut être par un nombre complexe $\bar{x} = x_\alpha + jx_\beta$ dans le même plan tournant à la vitesse lié à la fréquence du système triphasé. \bar{x} est appelé phaseur donné par [11] :

$$\bar{x} = k_T \cdot [\wedge]_{1 \times 3} \cdot [x]_{3 \times 1} = k_T \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \end{bmatrix}}_{[\wedge]_{1 \times 3}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}}_{[x]_{3 \times 1}} = k_T (X_a + aX_b + a^2 X_c) \quad 2-8$$

Avec, $a = e^{j2\pi/3}$ l'opérateur de Fortescue déphaseur à 120° vérifiant l'identité $1 + a + a^2 = 0$

$k_T = \sqrt{\frac{2}{3}}$ pour le cas de la conservation des puissances selon la transformation de Concordia. Ce coefficient peut être pris à l'unité pour la suite des calculs

$[\wedge]$ est le vecteur espace de position à $\pm 120^\circ$. La notion du phaseur est généralisée pour toutes les grandeurs électriques courant, tension ou flux.

A l'exemple du courant le phaseur \bar{i} peut être défini à la manière d'un complexe par

$$\bar{i} = i e^{j\xi} \quad 2-9$$

Avec, $i = \|\bar{i}\| = i(t)$ et $\xi = \arg \bar{i} = \xi(t)$ 2-9-a

Les vecteurs \bar{i} et \bar{i}^* pourront être aisément vérifiés par une construction géométrique illustrée sur la figure 2.2.

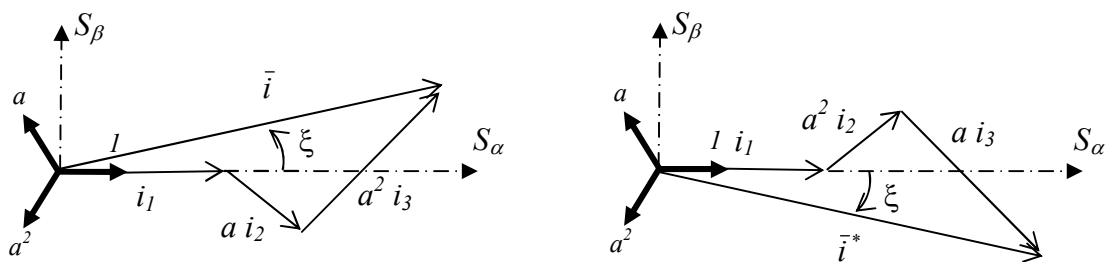


Figure 2.2 Construction vectorielle d'un phaseur d'un système de courant triphasé

2-3-2 Transformation Rotation « Park 2x2 »

Le module du complexe \bar{x} est invariant avec les repères en rotation, on peut transcrire les relations données ci-après, où les indices en exposant expriment le référentiel de mesure, voir figure 2.3. Le référentiel unique (d,q) est, dit de Park tournant à la vitesse $d/dt(\theta_{obs})$ où l'on a trois choix de référentiels : $\theta_{obs} = 0$ pour le stator, $\theta_{obs} = p \int \Omega dt$ pour le rotor et $\theta_{obs} = \int \omega_s dt$ pour le référentiel lié au champ tournant.

Passage stator-dq

$$\bar{x}^{(S)} = \bar{x}^{(dq)} e^{j\theta_{obs}} \quad 2-10$$

Passage rotor-dq

$$\bar{x}^{(R)} = \bar{x}^{(dq)} e^{j(\theta_{obs} - \theta)} \quad 2-10-a$$

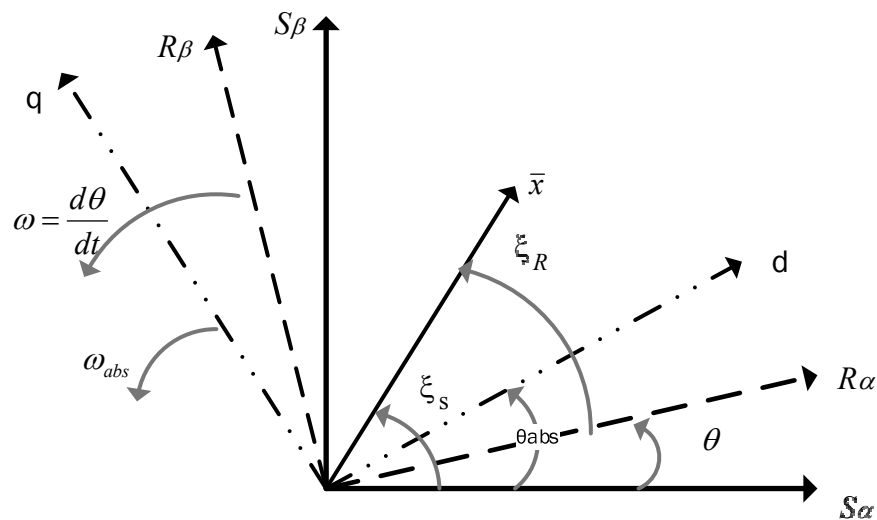


Figure 2.3 Représentation du complexe x selon les trois repères plan orthogonaux

2-4 Modélisation à formulation complexe d'une machine asynchrone

2-4-1 Modèle complexe de la MAS dans référentiels séparés

L'application à gauche du vecteur position $[\wedge]_{1 \times 3}$ aux équations flux 2-2, donne en notation complexe ce qui suit [4-7] :

$$\bar{\phi}_S = L_S \bar{i}_S + M \bar{i}_R e^{j\theta} \quad 2-11$$

$$\bar{\phi}_R = L_R \bar{i}_R + M \bar{i}_S e^{-j\theta} \quad 2-12$$

Où, $L_S = l_s - m_s$ et $L_R = l_r - m_r$ représentent respectivement les inductances cycliques propres du stator et du rotor et $M = \frac{3}{2} m_0$ est l'inductance cyclique mutuelle stator-rotor.

La même application du même vecteur $[\wedge]_{1 \times 3}$ aux équations tension triphasée, conduit à écrire

$$\bar{v}_S = R_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\phi}_S}{dt} \quad 2-13$$

$$\bar{v}_R = R_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\phi}_R}{dt} \quad 2-14$$

L'expression du couple peut être aussi déduite de la même manière que dans la section 2-2-2.

$$Ce = p \cdot M \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_S^* & \bar{i}_R^* \end{bmatrix}_{1 \times 2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & je^{j\theta} \\ -je^{-j\theta} & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \bar{i}_S \\ \bar{i}_R \end{bmatrix}_{2 \times 1} \quad 2-15$$

Les équations mécaniques vitesse et position restent idem comme précédemment, voir les équations 2-4 et 2-5.

2-4-2 Modèle complexe de la MAS dans référentiel de Park

En utilisant les relations de rotation 2-10 et 2-10-a, les relations flux-courant 2-11 et 2-12, tensions 2-13 et 2-14 et couple électromagnétique s'expriment dans le référentiel unique de Park (dq) comme données ci-dessous (Même topo pour la mécanique) [6-11].

$$\bar{v}_S = R_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\phi}_S}{dt} + j\omega_S \bar{\phi}_S \quad 2-15$$

$$\bar{v}_R = R_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\phi}_R}{dt} + j(\omega_S - p\Omega) \bar{\phi}_R \quad 2-16$$

$$\bar{\phi}_S = L_S \bar{i}_S + M \bar{i}_R \quad 2-17$$

$$\bar{\phi}_R = L_R \bar{i}_R + M \bar{i}_S \quad 2-18$$

$$C_e = p \cdot M \cdot \Im m[\bar{i}_S \bar{i}_R^*] = p \cdot \frac{M}{L_R} \Im m[\bar{i}_S \bar{\phi}_R^*] \quad 2-19$$

2-5 Applications : génératrices asynchrones simple (GAS) et double alimentée (GADA/MADA)

2-5-1 Simulation de la génératrice asynchrone (GAS)

Les conditions d'autoamorçage d'une GAS sont suffisamment développées dans les références [6],[13], et notamment dans la thèse de magister [14]. Dès lors il est repris dans cette section l'essentiel pour une simulation de ce phénomène de l'auto amorçage nécessitant une modélisation en saturé de la machine pour développer une convergence de ce processus d'amorçage [16 - 17]. La génératrice asynchrone simple alimentée (éventuellement à cage) doit être entraînée au-delà de sa vitesse de synchronisme pour pourvoir fournir l'énergie électrique. Dépourvue du circuit d'excitation autonome comme les alternateurs, ou autres comme la double alimentée (MADA), la magnétisation de la génératrice asynchrone lui est assurée par une batterie de condensateurs correctement dimensionnés pour réaliser les conditions de l'autoamorçage et enfin les entretenir. La présence d'un flux magnétique rémanent dans l'entrefer du rotor est indispensable pour son auto-amorçage. Il est possible, dans ces conditions, d'utiliser une génératrice asynchrone en dehors d'un réseau pour un fonctionnement dit autonome pour pouvoir alimenter une charge isolée, voir figure 2.4.

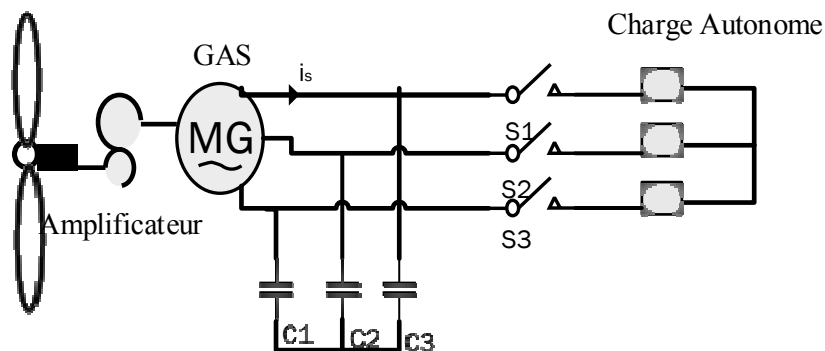


Figure 2.4. Chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice asynchrone auto-amorçée

Aux équations précédentes de la modélisation complexe, elle est ajoutée, aussi bien dans les référentiels séparés que celui dans un référentiel unique de Park lié au stator, l'équation tension de la batterie de condensateur est ajoutée telle que donnée ci-dessous (le signe moins indiquant le

fonctionnement génératrice). Via un interrupteur triphasé, le stator est raccordé à une charge autonome, par exemple une charge résistive (voir figure 2.5).

$$-\frac{d}{dt}\bar{v}_s = \frac{1}{C}\bar{i}_s \quad 2-20$$

En charge, un nœud pour les courants est présent tel que la charge résistive sera donnée par le système ci-dessous. Les indices « c » et « ch » introduits signifient respectivement condensateur et charge.

$$\begin{cases} \bar{i}_c = \bar{i}_s - \bar{i}_{ch} \\ \bar{v}_s = \frac{1}{C} \int \bar{i}_c dt \\ \bar{i}_{ch} = \frac{\bar{v}_s}{R_s} \end{cases} \quad 2-21$$

Il est démontré que les conditions d'autoamorçage ne peuvent avoir lieu, avec un fonctionnement convergent, que si la caractéristique de magnétisation saturée est prise en considération, c'est à l'image de la droite inducteur pour le cas de la génératrice à courant continu à excitation shunt. Dans le cas de la GAS cette droite est assurée par l'équation tension du condensateur, voir figure 2.5. Ainsi il devient important de reconsidérer les flux du stator et du rotor en faisant intervenir le flux commun de magnétisation qui est fonction du courant de magnétisation tels que les expressions mentionnées ci-dessous [16 - 17].

$$\begin{cases} \bar{\phi}_s = l_{\sigma s} \bar{i}_s + \bar{\phi}_\mu \\ \bar{\phi}_r = l_{\sigma r} \bar{i}_r + \bar{\phi}_\mu \\ \bar{\phi}_\mu = M \bar{i}_\mu \Leftarrow M = f\left(\left|\bar{i}_\mu\right|\right) = \frac{\left|\bar{\phi}_\mu\right|}{\left|\bar{i}_\mu\right|} \\ \bar{i}_\mu = \bar{i}_s + \bar{i}_r \end{cases} \quad 2-22$$

Avec, $l_{\sigma s} = L_s - M$ et $l_{\sigma r} = L_r - M$ représentant respectivement les inductances des flux de fuites au stator et au rotor et qui sont assumées égales à des constantes.

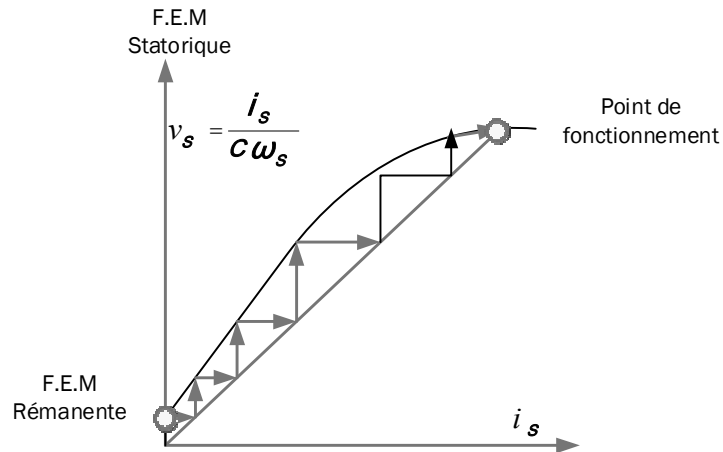
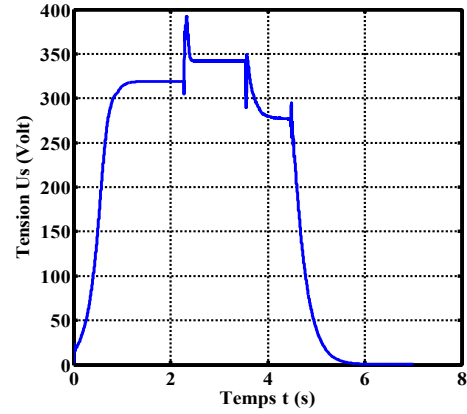
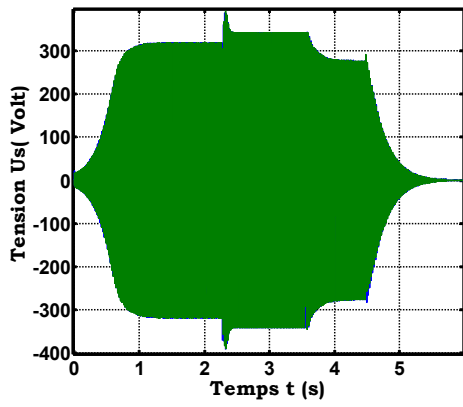
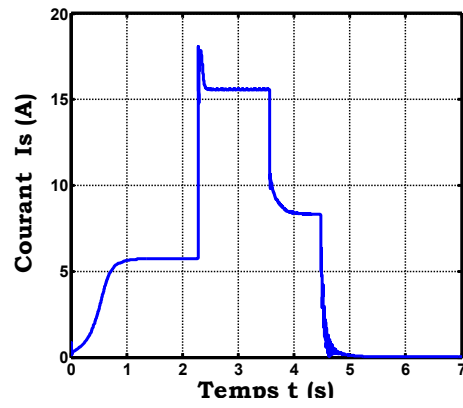
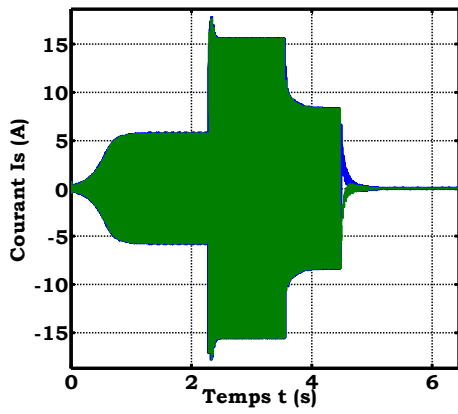


Figure 2. 5 phénomènes d'auto-amorçage

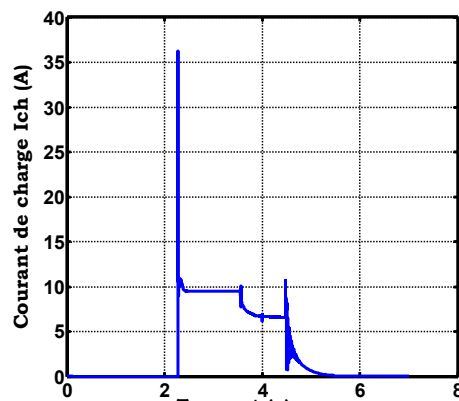
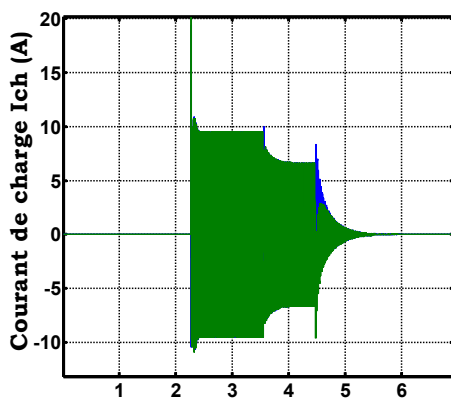
La figure 2.6 illustre les résultats de la simulation du processus de l'auto-amorçage à vide d'une génératrice asynchrone en régime saturée suivi d'un débit sur charge résistive. La génératrice est entraînée par une éolienne, constituant l'aérogénérateur autonome dont la tension n'est pas imposée et la présence d'une batterie de condensateur est primordiale, voir data en annexe 1. D'abord à vide, il y a une apparition d'une tension amorcée à ses bornes, évidemment par l'existence d'un champ rémanent. A l'amorçage, notons l'accroissement exponentiel de la tension et le courant du stator. Après convergence, la génératrice est mise à débiter sur des charges capacitatives et résistives. Une charge inductive pourrait démagnétiser la machine, la tension et le débit en courant s'effondrent, ainsi l'entretien de son fonctionnement requière un appoint de puissance réactive avec une batterie de condensateurs modulable [18 – 20].



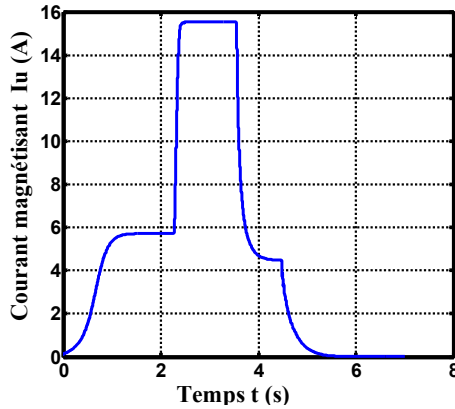
(a) Tension stator - temps



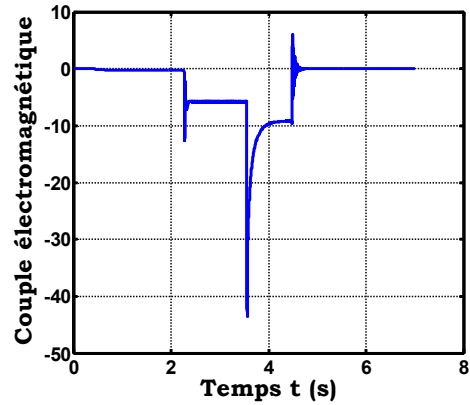
(b) Courant de ligne - temps



(c) Courant traversant la charge-temps



(d) Courant magnétisant-temps



(e) Couple électromagnétique-temps

Figure 2.6 Résultats de simulation d'une GAS amorcée et chargée

2-5-2 Simulation de la génératrice double alimentée (GADA)

(i) Fonctionnement et Particularités

On considère dans cette section le fonctionnement de la machine à induction double alimentée dans les quatre quadrants en moteur et génératrice en hypo synchrone et hyper synchrone, c'est-à-dire en sous vitesse et en sur vitesse par rapport à la vitesse synchrone liée à la fréquence du stator. Il est plus convenant d'utiliser le modèle à référentiels séparés à formulation complexe sans avoir un recours aux transformations de Park (rotation). Donc l'action des tensions aux armatures du stator et du rotor devient directe [5-6].

La machine asynchrone double alimentée dans ses deux versions de fonctionnement moteur ou générateur s'avère délicate à commander en boucle ouverte sans le processus du feedback. Ainsi l'injection des tensions en amplitude et en fréquence doivent être injectées dans le sens que la dérivée de l'angle de charge entre les deux forces magnétomotrice (*fmm*) du stator et du rotor doit être nulle, c'est-à-dire offrant la possibilité de réaliser une parfaite démodulation des grandeurs continues telles que le couple et la vitesse en offrant à la machine plus de stabilité [21-24]. La vitesse de la machine asynchrone double alimentée est exprimée Ω sous forme de combinaison linéaire entre les pulsations des fréquences du stator ω_S et du rotor ω_R comme ci-après. La présence de l'angle de charge dans la dite machine est illustrée sur la figure 2.7.

$$\Omega = \frac{1}{p} \left(\omega_S \mp \omega_R \mp \frac{d}{dt} \delta \right) \quad 2-23$$

La machine asynchrone double alimentée possède un caractère ambivalent entre l'asynchrone et le synchrone, plutôt se rapprochant de ce dernier dont la stabilité de la machine en boucle ouverte dépend énormément de l'angle de charge lié à la fois à la charge et même à l'injection des tensions [14]. La vitesse de la machine asynchrone double alimentée est exprimée comme ci-après.

(ii) Modèle et Simulation

Le modèle de la dite machine est celui donné des équations électromagnétiques 2-13, 2-14 et 2-14 et mécanique 2-4 et 2-5. Sous sa formulation d'état non linéaire s'écrit comme ci-après.

$$\dot{\bar{x}}_{4 \times 1} = f(\bar{x})_{4 \times 1} + g(\bar{x})_{4 \times 3} \bar{u}_{3 \times 1} \quad 2-24$$

Avec,

$$\bar{x} = [\bar{i}_S \quad \bar{i}_R \quad \Omega \quad \theta]_{4 \times 1}^t \quad 2-24-a$$

$$\bar{u} = [\bar{v}_S \quad \bar{v}_R \quad C_R]_{3 \times 1}^t \quad 2-24-b$$

$$f(\bar{x})_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} -\alpha_S \bar{i}_S + jp\beta_{\mu S} \Omega \cdot \bar{i}_S + jp\beta_{\mu R} \frac{R_R}{M} \Omega \cdot e^{j\theta} \cdot \bar{i}_R - j\alpha_R \frac{M}{R_R} p\Omega \cdot e^{j\theta} \cdot \bar{i}_R \\ \beta_{\mu S} \bar{i}_S - j\beta_{\mu S} p\Omega e^{-j\theta} \bar{i}_S + \alpha_S \bar{i}_S \\ pM(\bar{i}_S^* \bar{i}_R e^{-j\theta} - \bar{i}_S \bar{i}_R^* e^{j\theta}) \\ \Omega \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad 2-24-c$$

$$g(\bar{x})_{4 \times 3} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_S} & \frac{(\sigma-1)}{\sigma M} e^{j\theta} & 0 \\ \frac{(\sigma-1)}{\sigma M} e^{-j\theta} & \frac{1}{\sigma L_R} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 3} \quad 2-24-d$$

$$\text{Où, } \alpha_s = \frac{R_S}{\sigma L_S} ; \alpha_R = \frac{R_R}{\sigma L_R} ; \beta_{\mu S} = \frac{\sigma}{\sigma-1} \frac{R_S}{M} \quad \beta_{\mu R} = \frac{\sigma}{\sigma-1} \frac{R_R}{M}$$

Les différentes simulations du modèle d'une machine asynchrone double alimentée (les expressions 2-24) est effectuée selon la version moteur ou générateur initialement avec un démarrage en moteur, sur une période de $\frac{1}{4}$ de seconde, en simple alimentation du stator

supposée à partir d'un réseau puissant imposant fréquence et tension nominales (380/220 V ; 50 Hz). Ensuite, le rotor étant ouvert à partir desquelles des tensions en amplitudes et fréquences sont appliquées sous des valeurs adéquates pour assurer un fonctionnement stable en double alimenté. Le fonctionnement générateur étant acquis avec des couples résistants négatifs, et par la même ils sont appliqués positivement pour le cas moteur. Deux couples résistants différents sont appliqués à deux instants différents à $\frac{1}{4}$ seconde et à $\frac{3}{4}$ seconde. L'action sur le signe de la fréquence du rotor fait aboutir à un fonctionnement en hypo-synchrone (fréquence positive), et en hyper-synchrone (fréquence négative).

Les résultats des différentes de simulation de la dite machine sont rassemblés, ci-après, dans les figures 2.7 et 2.8, pour le cas générateur (GADA : Générateur Asynchrone Double Alimenté) et dans les figures 2.9 et 2.10 (MADA : Moteur Asynchrone Double Alimenté). Les courbes des différentes variables évoluant dans le temps, illustrées par les simulations données dans les figures susmentionnées, sont comme suit:

- (i) La vitesse du rotor avec indication des vitesses synchrone et hyper ou hypo synchrone,
- (ii) Les courants du rotor, à partir desquelles sont observés les fréquences injectées dans le rotor , les valeurs sont indiquées sur les sous-figures respectives
- (iii) Les trois puissances concernant la puissance mécanique, la puissance du stator et la puissance du rotor
- (iv) Le couple électromagnétique et le couple résistant.

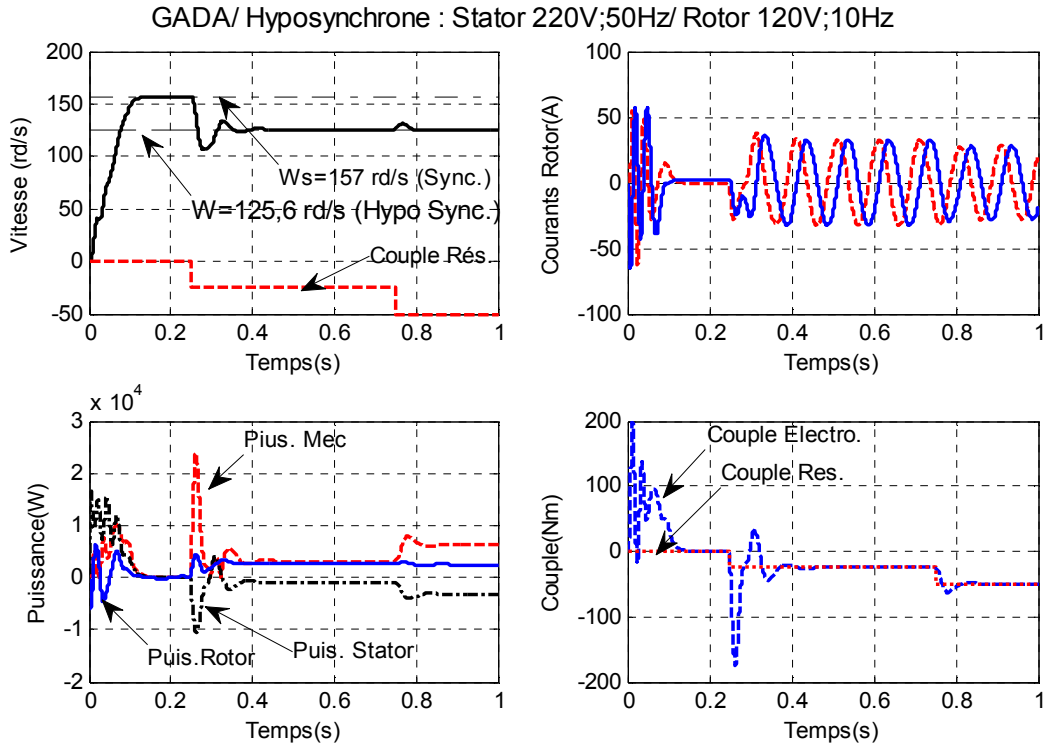


Figure 2.7 Fonctionnement de la GADA en hypo synchrone (Générateur)

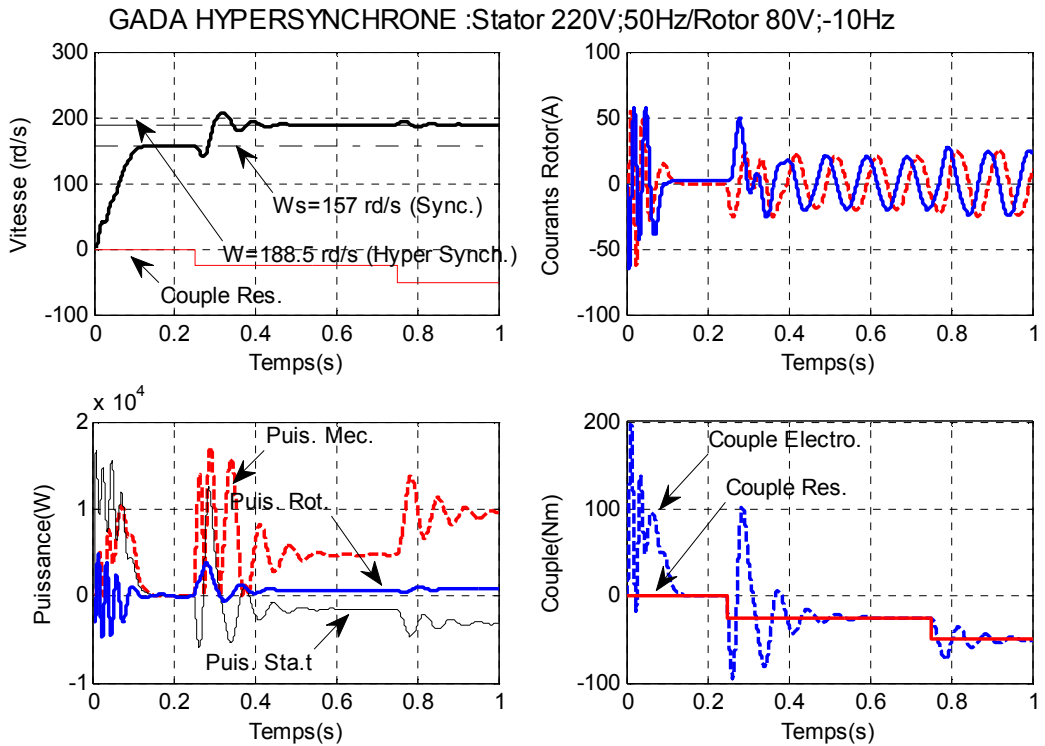


Figure 2.8 Fonctionnement de la GADA en hyper synchrone (Générateur)

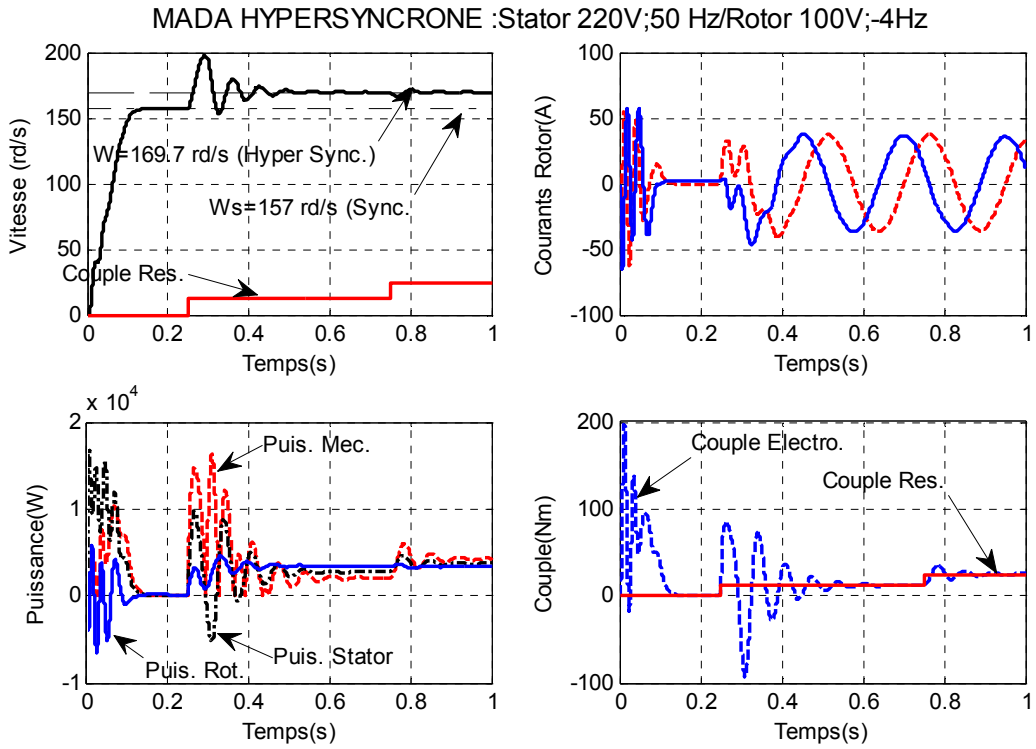


Figure 2.9 Fonctionnement du MADA en hyper synchrone (Moteur)

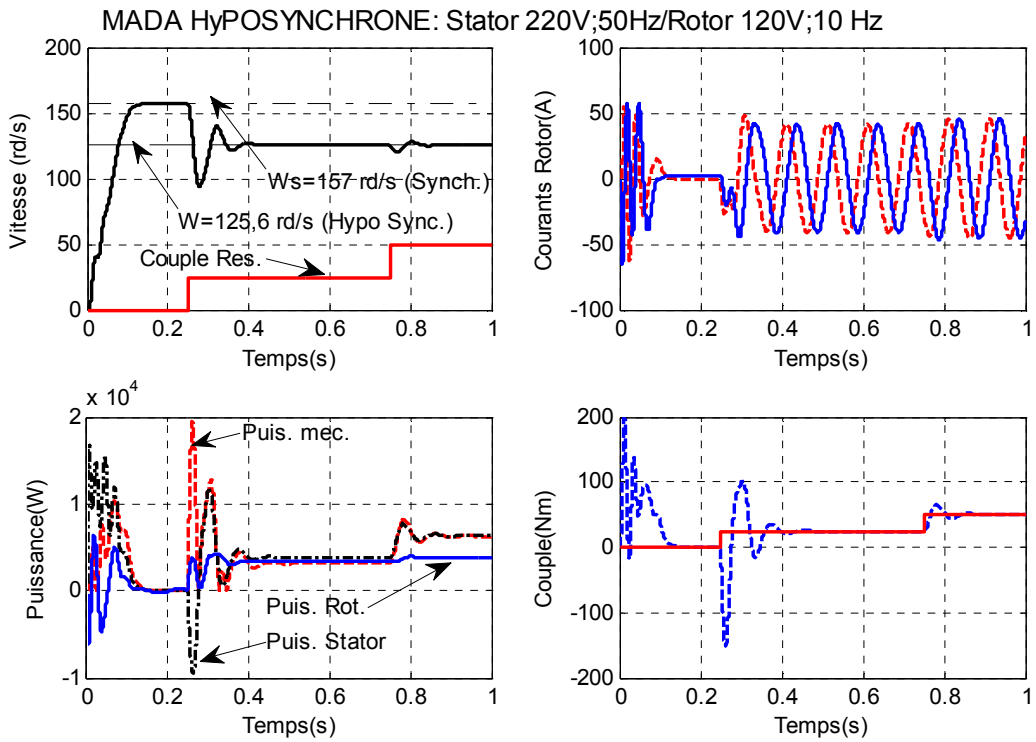


Figure 2.10 Fonctionnement du MADA en hypo synchrone (Moteur)

2.6 Conclusion

A travers ce chapitre, il a été question d'exposer la modélisation à formulation complexe d'une génératrice asynchrone sous ces deux versions simple et double alimentation. Dans la simple alimentation (GAS), un appoint de puissance réactive est requis moyennant une batterie de condensateurs, ce qui n'est pas le cas pour la double alimentée (GADA/MADA) dont la magnétisation saturée peut être occasionnée par les deux armatures et qu'elle n'est pas trop exigée saturée comme le cas de la GAS.

Aussi, il a été montré que l'on peut passer du modèle triphasé, à deux armatures de dimension électromagnétique 6×6 (flux et courant), au modèle sous formulation complexe à deux armatures de dimension 2×2 électromagnétique. La modélisation de la machine asynchrone sous sa formulation complexe dont les bénéfices sont orientés sur le temps de calcul requis aussi bien en commande qu'en observation. Déjà, en boucle ouverte, dont le modèle de la machine asynchrone double alimentée est fortement non linéaire laissent des difficultés quant à sa commande et par là il devient impératif de la contrôler en boucle fermée en assumant à réduire les couplages.

La production de l'énergie électrique via l'armature du stator se trouve directement modifiée par la variation de la vitesse de l'aérogénérateur éolien, par l'apport réactif de magnétisation, par charges connectées à la machine. Les variations de la tension et de la fréquence, lors des impacts de charge enregistrés, sont dues aux écarts de vitesse dus et/ou éventuellement à l'imprécision du dispositif d'orientation des pales de l'éolienne.

La suite, à donner à ce travail, consiste à développer un système de contrôle, en utilisant à la fois l'électronique de puissance concise, et un contrôle bouclé des flux de puissances en veillant sur un optimum important de la puissance active.

2.7 Références Bibliographiques

- [1] Alois. Schaffarczyk ; ' Understanding wind power technology,theory, deployment and optimization ', Wiley, 2014.
- [2] Ke. Ma; 'Power electronic for the next generation wind turbine system', Springer, 2015.
- [3] Venkata Yaramasu, Bin Wu, Paresh C. Sen, Samir Kouro, and Mehdi Narimani, 'High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies', Proceedings of the IEEE | Vol. 103, No. 5, pp: 740_788, May 2015.

- [4] R. P. BOUCHARD, et G. OLIVIER, "Conception de moteurs asynchrones triphasés", Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1997
- [5] D. W. Novotny, T. A. Lipo, « Vector Control and Dynamics of AC Drives », livre Biplished by Oxford press, 1996, New Work, USA
- [6] [T. A. Lipo](#), « Introduction to AC Machine Design », Copyright © 2017 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Published simultaneously in Canada, 2017.
- [7] N. Naït –Saïd, "Contribution à l'identification et à la commande de la machine à induction", Thèse de Doctorat, Université de Batna, juin 2003.
- [8] M.S. Nait-Said, "Modélisation Vectorielle d'une Machine à Courant Alternatif, " Notes de Cours éditées à Université de Batna, Avril 2006
- [9] [J. Lesenne](#), [F. Notelet](#), [G. Séguier](#), "Introduction à l'Electrotechnique Approfondie, " livre Edition Technique et documentation, 1981, Paris, France
- [10] Guy Grellet et Guy Clerc, "Actionneurs Electriques : Principes- Modèles- Commande, " Edition Eyrolles, Paris, 1996
- [11] Max Marty, Daniel Dixneuf, Delphine Garcia Gilabert, "Principes d'Electrotechnique, " Edition Dunod, Paris, 2005
- [12] Werner Leonhard, "Control of Electrical Drives, Edition Springer-Verlag", Berlin, 1996
- [13] S. Mektoub, "Machines asynchrone en régime saturé", Thèse de doctorat, ENP Alger, 1995.
- [14] N. Mekkaoui, " Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée , " Thèse de Magister, soutenue à l'université de Batna, le 26 mai, 2008
- [15] E.Levi, " Impact of Cross-Saturation on Accuracy of Saturated Induction Machine Models", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 3, Sept., 1997.
- [16] M.S. Nait-Said, et all, "Approach of saturated induction machine modeling by means of HG-diagram, " IEEE- IEMD '99, Proceedings of International Conférences of Electric Machines and Drives, 1999, pp.333-339
- [17] N. Nait-Said, Induction machine parameters identification using modified H-G diagram, IEEE-ICECS, Proceeding of 10th Confrence on Electronics Circuits and Systems, 2003, pp. (DOI: 10.1109/ICECS.2003.1302054)

- [18] K. Idjdarene, D. Rekioua et D. Aouzellag, "Modélisation et Simulation d'une Chaîne de Conversion à Energie Eolienne Basée sur une Génératrice Asynchrone en Fonctionnement Autonome", 3rd Conference on Electrical Engineering 04 - 06 October 2004, pp 297 -300.
- [19] D. Seyoum, C. Grantham, and M.F. Rahman, "The Dynamic Characteristics of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine", IEEE Transactions on industry application, vol. 39, no. 4, July/August 2003.
- [20] Y. Zidani, and M. Naciri, "A Numerical Analytical Approach for the optimal Capacitor used for the Self Excited Induction Generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, pp 216-220.
- [21] J.B. Ekanayake, et all, "Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines, IEEE Transactions on Power System", Volume: 18 Issue: 2, May 2003, pp. 803 – 809
- [22] L. M. Popa, F. Blaabjerg, I. Boldea, "Wind Turbine Generator Modeling and Simulation Where Rotational Speed is the Controlled Variable", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 1, January/February 2004.
- [23] S. Muller, M. Deicke, R. W Doncker, "Doubly-Fed Induction Generators Systems for Wind Turbines, IEEE Industry Applications Magazine, May, June 2000.
- [24] Andreas Petersson, "Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines", Department of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology, Sweden 2003

CHAPITRE 3

MODÉLISATION ET ALGORITHME DES TECHNIQUES MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSIONS : Technique ISVM (*Imaginery Space Vector Modulation*)

3.1 Introduction

La Modulation en Largeur d'Impulsions (MLI), ou en anglais Pulse Width Modulation (PWM), est une technique de pilotage pour les convertisseurs statiques de l'électronique de puissance (onduleurs, redresseurs contrôlés, hacheurs, etc.) [1]. Ces composants de l'électronique puissance font office d'interface entre une charge (machine électrique, ...) et son alimentation généralement fixe. Cette interface, constituée de convertisseur(s), est donc utilisée pour moduler l'énergie alimentant la charge pour réaliser des performances requises [2-3]. La MLI est, par là, une technique employée pour la modulation l'énergie et qui se trouve ainsi contrôlée par la commutation des interrupteurs statiques selon une cadence donnée et une stratégie donnée [1], [4-5].

Le choix d'une stratégie MLI, se plaçant entre l'algorithme lié aux aspects-commande et l'électronique, joue un rôle important sur les performances d'entraînement (moteur) ou de

production (générateur), et en outre sur les pertes dans l'onduleur ou dans la machine, le bruit acoustique, le bruit électromagnétique, la présence des surtensions destructives, [6-8]...

Plusieurs types de modulateurs sont à différencier sur l'aspect de la fonction MLI de part sa génération de la modulante et « information voulue » qui pourrait ne pas tenir compte des impulsions de commandes. A l'exemple de la MLI dans les commandes en boucle fermée par les contrôleurs à hystérésis [9].

De nos jours, aussi bien en entraînement qu'en génération, le monde industriel est orienté en grande partie vers les machines électriques asynchrones qui sont des machines connues pour leur simplicité de construction, leur robustesse électromagnétique, leur coût et leur entretien suffisamment réduit. En terme de performances et en valeur ajoutée, les stratégies MLI jouissent d'un intérêt particulier pour la résorption des problèmes liés aux bruits électromagnétiques et acoustiques, à la pollution harmonique et à la préservation de la qualité d'énergie électrique [7-8]... Les remèdes à ces problèmes sont liés en grande partie à l'évolution considérable du matériel utilisé, notamment les nouvelles technologies des composants semi-conducteurs appropriés et rapides avec « commutation zéro » en performant les convertisseurs statiques pour leur élargissement dans le domaine des actionneurs, moteur ou générateur, à vitesse variable [9-11].

La MLI dite **SVM**, de l'anglais *Space Vector Modulation*, connue aussi sous l'appellation MLI-vectorielle étant une modulation s'inspirant d'une MLI régulière, par sectorisation, et d'une MLI intersective naturelle par la détermination de ses temps d'application des vecteurs de référence de tension. L'attrait de cette technique est qu'elle synthétisée par une représentation complexe pilotant un onduleur à deux niveaux, ou autres, dont les avantages sont significatifs en terme de l'amélioration du spectre harmonique et du temps de calcul [12-16].

Le présent chapitre présente les aspects de modélisation et d'algorithme des techniques MLI, et particulièrement la technique SVM dans un premier temps, ISVM dans l'autre. L'abréviation du « I » dans SVM, signifie imaginaire, l'ISVM permet de dégager une MLI ayant les performances acquises d'une SVM avec la particularité d'être aisément implantable en temps réel, notamment en expérimental, avec un minimum de calcul.

3.2 Définitions Onduleur/MLI

3.2.1 MLI

Un composant de l'électronique de puissance est un interrupteur statique ayant un fonctionnement binaire (1 ou 0) commuté selon une haute fréquence émanant d'une onde porteuse modulée par une modulatrice ou une information continue que l'on veut avoir hachée sous forme de train d'impulsion (faible puissance) au niveau de la gâchette de ce composant de puissance et par la même à sa sortie en puissance (émetteur-collecteur ou source-drain, par exemple). Le train d'impulsion représenté par ladite information qui est, en Electronique de Puissance, caractérisée par l'amplitude, la fréquence et la phase d'une tension ou d'un courant que l'on peut systématiquement contrôler par ces impulsions ainsi générées, et qui sont appelées communément Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI), en anglais Pulse Width Modulation (PWM) [1-4],

Le processus élémentaire créant cette MLI est produit par une simple comparaison entre le signal haute fréquence ou la porteuse (onde en onde de scie ou triangulaire) et le signal de la modulatrice ou modulante, signal variant en fréquence et en amplitude. C'est la technique MLI dite naturelle. Selon un échantillonnage de fréquence de la porteuse, qui pourrait être absente, la modulatrice est échantillonnée et la MLI dite régulière devient carrément numérique [18]. La figure 3.1 illustre le processus de production d'une MLI (bipolaire à ± 1) où la sous-figure d'en haut présente la porteuse (triangulaire à 500 Hz) et la modulatrice (signal de référence), la médiane présente la MLI générée par comparaison des deux signaux (mod. et porteuse) et la sous-figure d'en bas présente en plus des signaux de référence (modulation) et la MLI, le signal restitué de la référence par filtrage passe-bas de la MLI.

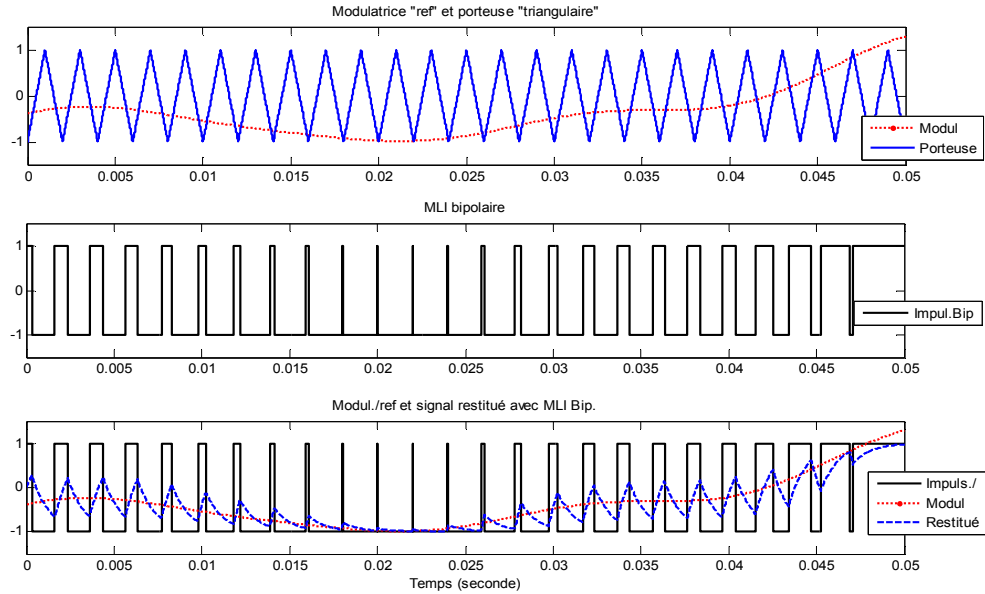


Figure 3.1. Illustration du processus de production d'une MLI (bipolaire)
Avec signaux : modulatrice, porteuse, MLI–Bipolaire et signal restitué par filtrage

3.2.2 Onduleur

L'onduleur de tension considéré est celui à deux-niveaux, en anglais Voltage Source Inverter (VSI). C'est un convertisseur couramment utilisé dans les actionneurs à vitesse variable, voir figure 3.2. Il est constitué de trois bras dont chacun comprend un interrupteur statique de l'électronique de puissance, un IGBT C_j avec anti-parallèle en une diode D_j avec $j=1$ à 6. Recevant à l'entrée du bus continu, une tension continue E , divisée en deux par un milieu fictif O , cette dernière est ondulée à la sortie aux niveaux des points de connections triphasées A , B et C constituant le départ de trois phases en triphasé. Au niveau de chaque bras, la commande des interrupteurs doit être complémentaire soit en pratique la commutation par exemple de $C1$ vers $C4$ doit se faire par un temps mort (*delay time*), sinon la source E serait court-circuitée. Cependant, en algorithme, cette complémentarité sur un même bras suppose négligeables les temps morts Les impulsions adaptées aux gâchettes (*gates*) des IGBTs sont générées par les ordres de commande logique binaire ON/OFF appliquées aux 6 interrupteurs. Ces ordres sont notés S_i (impulsion), avec $i=A$ ou B ou C , et sont formulés comme suit [3-4] :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si Interrupteur} = ON \\ 0 & \text{si Interrupteur} = OFF \end{cases} \quad i = A \text{ ou } B \text{ ou } C \quad 3-01$$

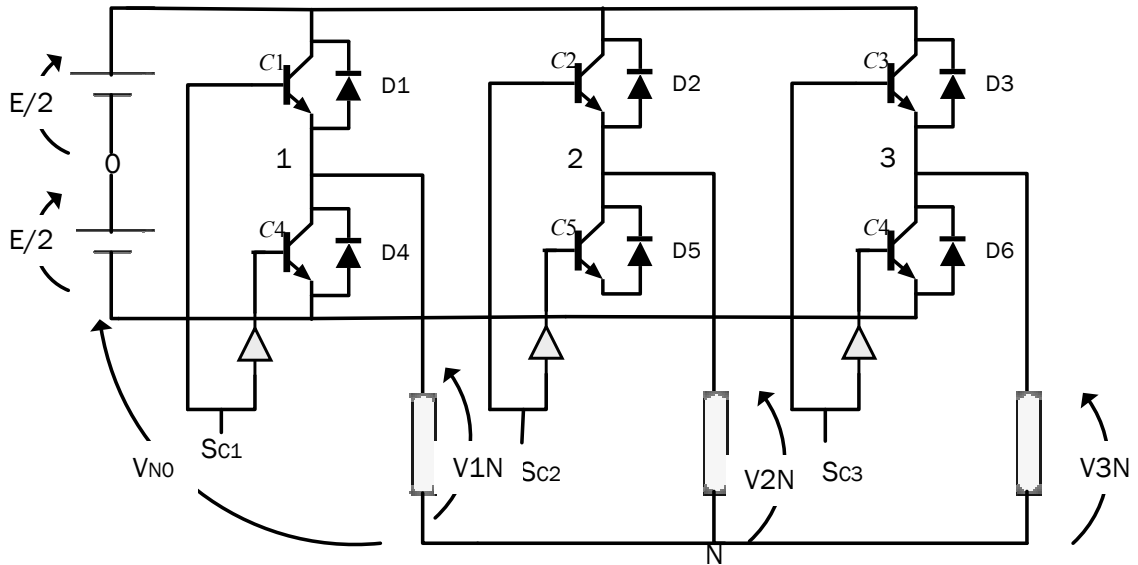


Figure 3.2 L'onduleur de tension triphasé à deux étages connecté à une charge

3.3 MLI–Sinusoïdales (triphasées) naturelle ou régulière

3.3.1 Définitions

La stratégie **MLI–Sinusoïdale** naturelle, dite intersective, est obtenue par la comparaison d'une onde porteuse $-V_{port}$ triangulaire (ou en dents de scie) haute fréquence avec une onde modulatrice $-V_{mod}$ de forme sinusoïdale et de fréquence égale à celle de la fréquence de travail de la charge. Les performances de modulation sont si élevées si la fréquence de la porteuse (de hachage) devient plus grande. L'algorithme est simple est donné pour chaque intervalle entre deux intersections consécutifs comme suit

$$\begin{cases} \text{Si } V_{mod} > V_{port} \Rightarrow S_i = 1 \\ \text{Si } V_{mod} < V_{port} \Rightarrow S_i = 0 \end{cases} ; \quad i = A \text{ ou } B \text{ ou } C \quad 3-02$$

Il en découle que la tension modulée (bipolaire ou carrée alternative) par phase sera ($V_{dc} \equiv E$ tension du bus continu) :

$$V_{iO} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_i - 1) \quad , \quad i = A \text{ ou } B \text{ ou } C ; \quad V_{dc} \equiv E \quad 3-03$$

La MLI–Sinusoïdale naturelle ou intersective est abondamment utilisée en électronique analogique pour ses raisons de facilité algorithmique en regard de sa complexité dans une implémentation numérique. En effet, c'est difficile de déterminer en temps réel les instants

d'intersections entre porteuse (équation d'une droite) et modulatrice (équation sinusoïdale) car il s'agit des équations transcendantes. Alléger la résolution des ces équations revient à échantillonner la modulatrice sinusoïdale au pas donné par la période (1/fréquence) de la porteuse et par conséquent l'intersection porteuse-modulatrice devient aisée à déterminer (entre les équations d'une constante et d'une droite) [19]. La figure 3.3 illustre les deux MLI-Sinusoïdales : MLI-naturelle et MLI-régulière et leur onde restituée. Dans les *subplots* (haut et médiane) sont représentées respectivement pour les deux dites MLI bipolaire, sa modulatrice sinusoïdale, sa porteuse et l'onde restituée de la MLI relativement à sa modulatrice. La *subplot* d'en bas montre les deux ondes restituées et leur référence modulatrice.

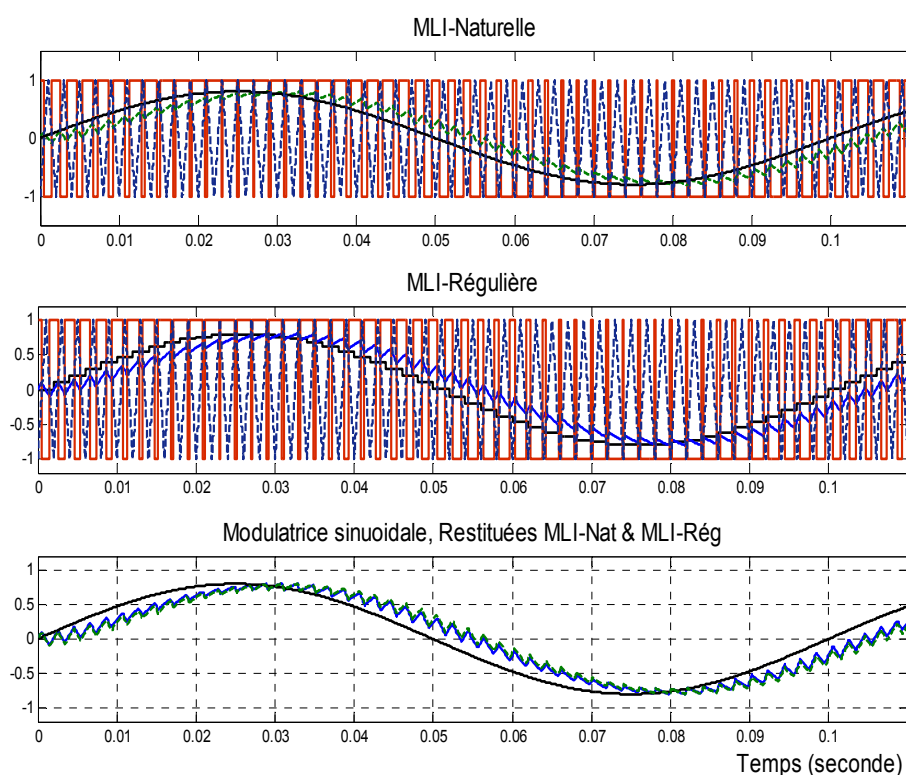


Figure 3.3 MLI-Sinusoïdales : MLI-Naturelle (en haut) , MLI-régulière (au milieu)
MLI-bipolaire restituée naturelle & régulière (en bas)

D'après la figure 3. 4, un zoom sur 6-T ($T=5\text{ms}$: période d'échantillonnage) d'une MLI-régulière (unipolaire) émanant d'une modulatrice échantillonnée par T se calcule par une moyenne connaissant le temps d'application de l'impulsion donnée par le rapport cyclique α par les équations suivantes.

$$V_{i0} \cdot T = T_{ON} \frac{V_{dc}}{2} - T_{OFF} \cdot \frac{V_{dc}}{2} = \frac{V_{dc}}{2} [T_{ON} - (T - T_{ON})] = V_{dc} \left(T_{ON} - \frac{T}{2} \right) \Rightarrow$$

3-04

$$V_{i0} = V_{dc} \left(\alpha - \frac{1}{2} \right) \quad \text{où, } \alpha = \frac{T_{ON}}{T} \quad \text{avec, } i = A \text{ ou } B \text{ ou } C$$

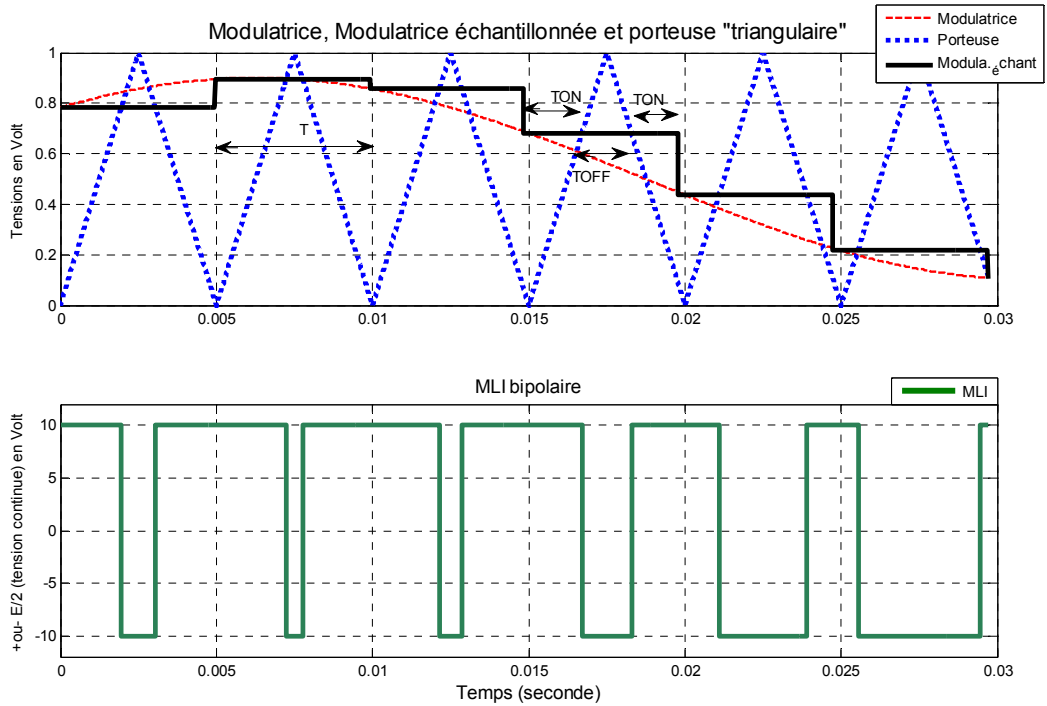


Figure 3. 4. MLI régulière émanant d’une modulatrice échantillonnée (6 périodes d’échantillonnage T)

Le fait d’avoir remplacé sur une période une portion d’une sinusoïde, la modulatrice se trouve tronquée et par la même des harmoniques en plus devront apparaître dans le spectre de fréquences. Ainsi, il devient judicieux d’augmenter la fréquence de commutation pour la MLI régulière. Le signal bipolaire de référence obtenue par modulation MLI–Sinusoïdale peut être décomposée en série de Fourier où l’on peut remarquer l’adjonction du terme fondamental de la modulatrice et les termes harmoniques de la porteuse telle que la parité de la décomposition ne fait ressortir qu’uniquement les termes en cosinus comme ci-après. La rigueur de cette approche est délicate à démontrer mais il apparaît que pour des modulations à fréquence faible devant la fréquence de découpage (donc k grand), le résultat est très proche de la réalité et au mérite de faire apparaître plus nettement les groupes dont nous soulignons l’existence comme il sera illustré ci-après

$$V_{i0} = V_{i_fond} + V_{i_harm} = \underbrace{m_i E \cos(2\pi f_{mod} t)}_{V_{i_fond}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(2k\pi f_{port} t)}_{V_{i_harm}} \quad i = A, B, C \quad 3-05$$

Où $m_i = V_{mod}/V_{port}$ est le rapport de modulation (profondeur de modulation), V_{mod} et V_{port} sont les tensions maximales de la modulatrice et de la porteuse, respectivement, alors que f_{port} et f_{mod} représentent les fréquences de la modulatrice et de la porteuse, respectivement.

Si la sur-modulation $m_i = V_{mod}/(V_{dc}/2) \leq 1$ alors la fréquence des harmoniques sont répertoriées dans le tableau ci-après comme suit [8]:

	Fréquences harmoniques $k.f_{port} \pm q.f_{mod}$	Amplitude
l pair & q impair	$k=2.l \& q=2.p-l$	$\frac{ A_{k,q} }{V_{dc}} = \frac{4}{k\pi} \left J_q \left(z = k \frac{\pi}{2} m \right) \right $
l impair & q pair	$k=2.l-1 \& q=2.p$	

Tableau 3.1

Avec, $J_q(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^q \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(-1)^r}{r!(q+r)!} \left(\frac{z}{2}\right)^{2r}$ est la fonction de Bessel et k, q, l, p et r sont des entiers positifs et dont le fondamental lié aux harmoniques de la porteuse est comme

$$A_{k,1} = \frac{4V_{dc}}{k\pi} \sin\left(k \frac{\pi}{2} (1 + m \sin(2\pi f_{mod} t))\right) \quad 3-06$$

Les figures 3.5 illustrent, sur une période de 20 ms en *subplot* d'en haut a), les tensions de référence sinusoïdale (modulatrice), d'une phase onduleur et de sa tension restituée par filtrage passe-bas et en *subplot* d'en bas b) le spectre harmonique de la tension onduleur (MLI-naturelle) avec une fréquence porteuse 5kHz. Notons les paquets d'harmonique multiple de 5 kHz comme indiqués précédemment aux formulations théoriques

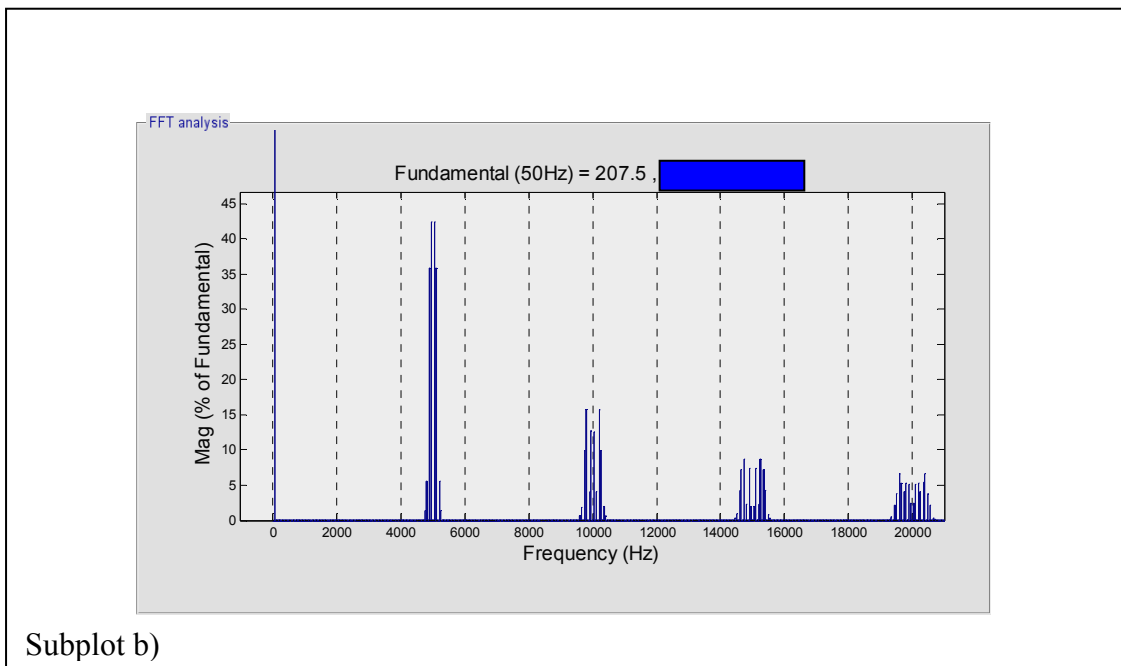
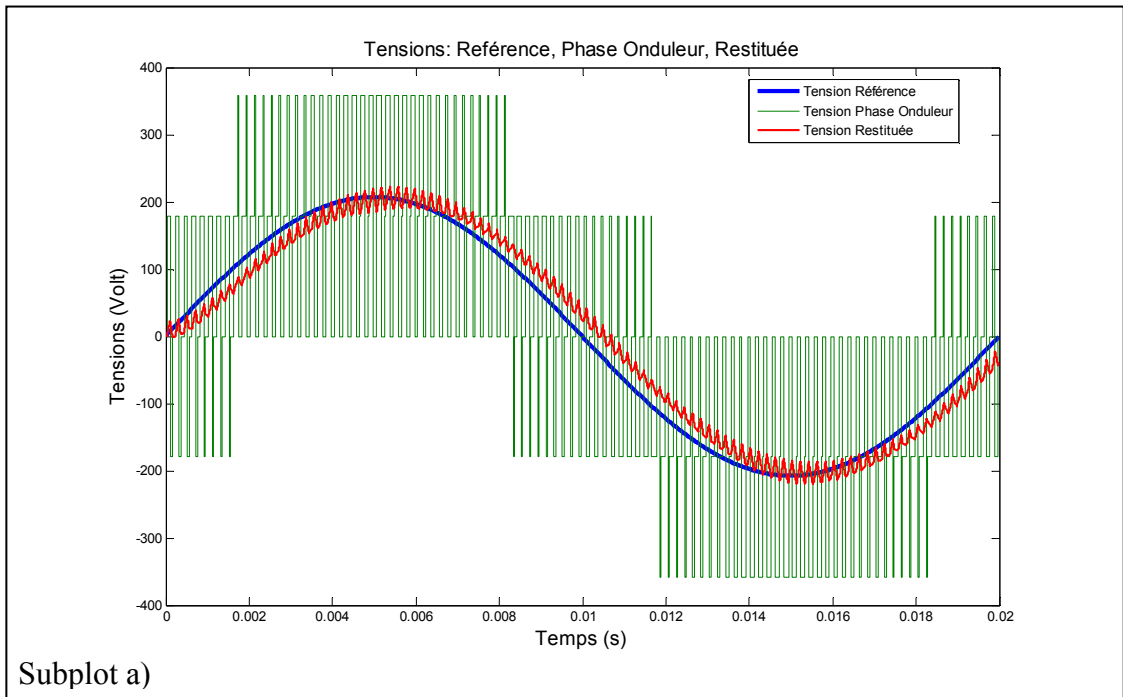


Figure 3.5 a) Tensions : Référence (modulatrice), phase onduleur et tension restituée
 b) Spectre harmonique tension onduleur (MLI–naturelle), fréquence porteuse 5kHz

3.3.2 Entre synchronisme & asynchronisme des MLI

Une MLI dite synchrone si le rapport k_f entre la fréquence porteuse f_p et la fréquence f_m modulante est un nombre entier, si ce dernier ne l'est pas elle est considérée comme MLI asynchrone, soit

$$k_f = \frac{f_p}{f_m} = \begin{cases} \text{entier} & \Rightarrow \text{MLI synchrone} \\ \text{non entier} & \Rightarrow \text{MLI asynchrone} \end{cases} \quad 3.7$$

La MLI asynchrone produit des harmoniques supplémentaires pouvant conduire à des oscillations sur le couple et la vitesse dans une machine électrique et elles pourraient le devenir intolérable si k_f est relativement faible.

3.4 MLI–Vectorielle ou SVM

Comme signalée précédemment, technique SVM est fréquemment identifiée avec la MLI vectorielle, explicitement une MLI en triphasée. Graphiquement, dans le plan $\alpha\beta$, elle est représentée par des vecteurs appliqués à l'onduleur. Elle est proche de la régulière mais sans modulatrice ou porteuse, les ordres de commutation sont directement calculés pour être appliqués à l'onduleur. Comparativement aux MLI naturelle et régulière, la SVM se repose sur un socle (background) mathématique solide par les équations qui lui sont conférées aboutissant à une implémentation particulière et relativement aisée [10-12][15-17] [20].

Un onduleur à deux niveaux, peut être modélisé par une matrice de transfert en se référant à l'équation 3-3. Il en découle les développements suivants.

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{V_{dc}}{2}(2 \cdot S_A - 1) \\ V_{BO} = \frac{V_{dc}}{2}(2 \cdot S_B - 1) \\ V_{CO} = \frac{V_{dc}}{2}(2 \cdot S_C - 1) \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{pmatrix} = V_{dc} \cdot \begin{pmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{pmatrix} - \frac{1}{2}V_{dc} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad 3-08$$

Les tensions simples aux niveaux de la charge triphasée ayant un point neutre N et sont équilibrées, $V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0$, s'écrivent en intercalant les tensions de références selon la relation de Schales tout en adoptant des indices compactes (chiffres=lettres) tels que $i = 1, 2, 3 \equiv A, B, C$, il vient ce qui suit

$$\left. \begin{aligned} V_{iN} &= V_{iO} + V_{ON} \Rightarrow V_{iN} = V_{iO} - V_{NO} \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^3 V_{iN} &= 0 \Rightarrow V_{NO} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 V_{iO} \end{aligned} \right\} ; i = 1, 2, 3 \equiv A, B, C \quad 3-09$$

$$\begin{pmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{pmatrix} - \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \sum_{i=1}^3 V_{iO} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{pmatrix} \quad 3-10$$

Et donc,

$$\begin{pmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{pmatrix} \quad 3-11$$

Selon la notion de phaseur, en terme amplitude selon la transformation de Clarke, du chapitre 2, on peut écrire sous formulation complexe que

$$\bar{v}_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} [V_{AN} + aV_{BN} + a^2V_{CN}] \quad 3-12$$

ou bien, $\bar{v}_s = |\bar{v}_s| e^{j \arg(v_s)}$

On peut en déduire la tension complexe en fonction des ordres de commutation comme suit.

$$\bar{v}_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta} = \frac{2}{3} V_{dc} \cdot [S_A + aS_B + a^2S_C] \quad 3-13$$

$$\text{Avec } a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Il vient pour chaque ordre d'application, un vecteur ou complexe $\bar{v}_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta}$, par exemple

$$\left\{ \begin{aligned} [S_A \ S_B \ S_C]^t &= [1 \ 0 \ 0]^t \Rightarrow \bar{v}_s = \frac{2}{3} V_{dc} \equiv V_1(100) \\ \Rightarrow v_{s\alpha} &= \frac{2}{3} V_{dc} \quad ; \quad v_{s\beta} = 0 \end{aligned} \right. \quad 3-14$$

Les commutations de l'onduleur possibles sont au nombre de 8 dont deux en sont nulles $V_0(000)$ et $V_7(111)$. Les 6 autres commutations sont telles que d'en haut pour les trois premiers deux interrupteurs fermés contre un ouvert ($V_2(110)$, $V_4(011)$, $V_6(101)$) et donc inversement pour les trois secondes ($V_1(100)$, $V_3(010)$, $V_5(001)$). La figure 3.6 montre la représentation complexe d'un onduleur de tension à deux niveaux selon les huit commutations citées ci-dessus.

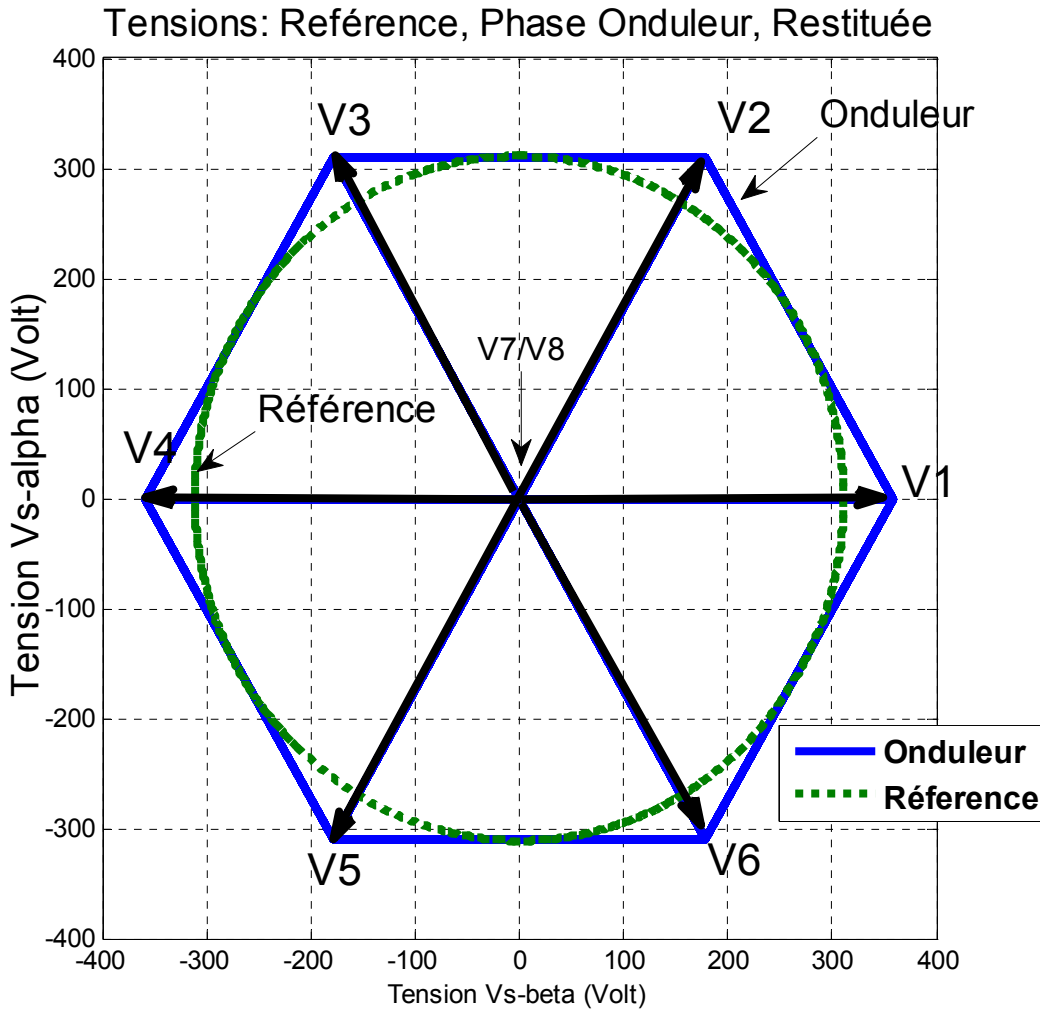


Figure 3.6 Représentation complexe d'un onduleur de tension à deux niveaux : Tension référence sinusoïdale (modulatrice) et tension onduleur/phase

Dans le plan $\alpha\beta$, ce sont les vecteurs de V_1 à V_6 qui peuvent être représentés alors que les V_0 et V_7 ne le sont pas. Ces derniers on les considère à l'origine. La représentation 2D en $\alpha\beta$ demeure suffisante sans tenir compte de la tension du neutre où les vecteurs homopolaires V_0 et V_7 se confondent. Ainsi prendre en considération ces derniers, revient à choisir un espace dit complexe où $V_0(000)$ et $V_7(111)$ sont distincts et supposés orthogonaux au plan $\alpha\beta$. Dès lors, les

coordonnées de cette représentation d'espace complexe seront considérées par $\alpha\beta$ où les huit combinaisons sont représentées. Le tableau 3.2 donné ci-après rassemble les huit combinaisons en question pour un onduleur à deux niveaux dont il est tenu compte les transformations triphasé–biphasé en puissance de Concordia et d'amplitude de Clarke. La figure 3.7 illustre une représentation dans l'espace complexe des vecteurs dans le repère abc et $\alpha\beta z$ selon la transformation en puissance de Concordia repères abc et $\alpha\beta z$. La transformation en amplitude de Clarke est obtenue de e celle Concordia en remplaçant le coefficient $\sqrt{2/3}$ par $2/3$ et la 3^{ème} ligne de la matrice ci-après $1/\sqrt{2}$ par $1/2$

$$\begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_z \end{pmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} \quad 3-15.$$

	Sc1	Sc2	Sc3	V10	V20	V30	V1N	V2N	V3N	V10	V20	V30	V10	V20	V30
				repère abc			plan $\alpha\beta$			repère $\alpha\beta z$ (Park amplitude)			repère $\alpha\beta z$ (Park puissance)		
V0	0	0	0	$-\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	0	0	0	0	0	$-\frac{E}{2}$	0	0	$-\frac{E\sqrt{3}}{2}$
V1	1	0	0	$\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	$\frac{2E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$\frac{2E}{3}$	0	$-\frac{E}{6}$	$E\sqrt{\frac{2}{3}}$	0	$-\frac{E}{2\sqrt{3}}$
V2	1	1	0	$\frac{E}{2}$	$\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$-\frac{2E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{\sqrt{3}}$	$\frac{E}{6}$	$E\frac{1}{\sqrt{6}}$	$E\frac{1}{\sqrt{2}}$	$E\frac{1}{2\sqrt{3}}$
V3	0	1	0	$-\frac{E}{2}$	$\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{3}$	$\frac{2E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$\frac{E}{\sqrt{3}}$	$-\frac{E}{6}$	$-E\frac{1}{\sqrt{6}}$	$E\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-E\frac{1}{2\sqrt{3}}$
V4	0	1	1	$-\frac{E}{2}$	$\frac{E}{2}$	$\frac{E}{2}$	$-\frac{2E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$-\frac{2E}{3}$	0	$\frac{E}{6}$	$-E\sqrt{\frac{2}{3}}$	0	$E\frac{1}{2\sqrt{3}}$
V5	0	0	1	$-\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	$\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$\frac{2E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{\sqrt{3}}$	$-\frac{E}{6}$	$-E\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-E\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-E\frac{1}{2\sqrt{3}}$
V6	1	0	1	$\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	$\frac{E}{2}$	$\frac{E}{3}$	$-\frac{2E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{\sqrt{3}}$	$\frac{E}{6}$	$E\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-E\frac{1}{\sqrt{2}}$	$E\frac{1}{2\sqrt{3}}$
V7	1	1	1	$\frac{E}{2}$	$\frac{E}{2}$	$\frac{E}{2}$	0	0	0	0	0	$\frac{E}{2}$	0	0	$E\frac{\sqrt{3}}{2}$

Tableau 3.2 Coordonnées des vecteurs dans le plan et dans l'espace dit complexe ($E \equiv V_{dc}$) [20]

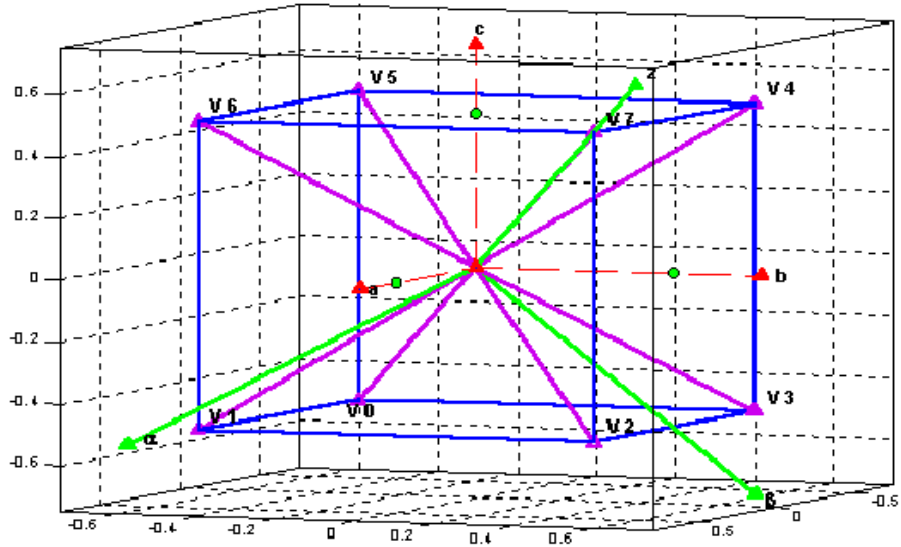


Figure 3.7 Illustration dans l'espace complexe des vect. Transfo. –puissance repères ABC et $\alpha\beta z$ [8]

Comme montré sur la figure 3.7, le vecteur tension de référence noté \vec{V}_s , ou de contrôle, dans le secteur 1, peut être décomposé sur une période de commutation T par une valeur moyenne pondérée relativement aux temps d'applications T1 et T2 et s'appuyant sur les vecteurs adjacents \vec{V}_1 et \vec{V}_2 tels que ($T_0=T-T_1-T_2$ temps d'application des tensions nulles) [16],[20]:

$$\begin{cases} \vec{V}_{ref} \equiv \vec{V}_s = \frac{T_1}{T} \vec{V}_1 + \frac{T_2}{T} \vec{V}_2 \\ T_0 = T - T_1 - T_2 \end{cases} \quad 3-16$$

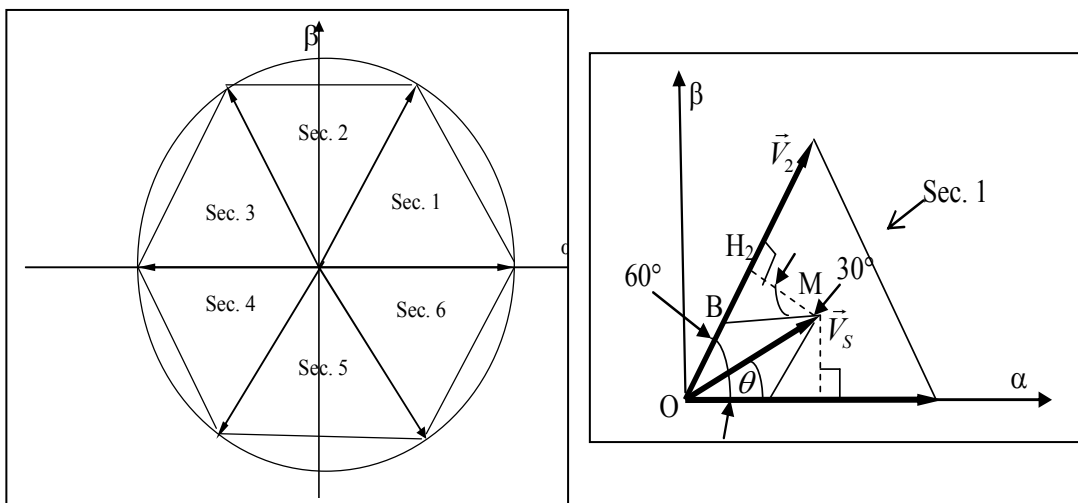


Figure 3.7 6-Secteurs onduleur complexe et décomposition vectorielle tension référence en 2D au secteur 1

En se référant à la figure 3.6, on peut étendre les développements suivants en vectoriel (2D), sur le secteur 1, pour enfin aboutir au calcul du temps d'application T_1 de V_1 et de T_2 de V_2 à partir de la tension 2D de référence fournie par la commande, ainsi il vient ce qui suit, [12] [14][20].

$$\text{On a,} \quad \overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{OB} \Leftrightarrow \vec{V}_s = \frac{T_1}{T} \vec{V}_1 + \frac{T_2}{T} \vec{V}_2 \quad 3-17$$

$$\begin{aligned} \|\overrightarrow{MH}_1\| &= \|\overrightarrow{OM}\| \sin(\theta) = \|\overrightarrow{OB}\| \cos(30^\circ) \Rightarrow V_s \sin(\theta) = T_1 V_2 \cos(30^\circ) \\ \Rightarrow V_s \sin(\theta) &= \frac{T_2}{T} V_2 \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow V_s \sin(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} E \frac{T_2}{T} \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} E \frac{T_2}{T} \end{aligned} \quad 3-18$$

$$\text{Alors,} \quad T_2 = \sqrt{2} \frac{V_s}{E} \sin(\theta) \cdot T = \sqrt{2} \frac{V_{s\beta}}{E} \cdot T \quad 3-19$$

$$\begin{aligned} \|\overrightarrow{MH}_2\| &= \|\overrightarrow{OM}\| \sin(60^\circ - \theta) = \|\overrightarrow{OB}\| \cos(30^\circ) = \|\overrightarrow{OA}\| \cos(30^\circ) \\ \Rightarrow V_s \sin(60 - \theta) &= \cos(30^\circ) V_1 \frac{T_1}{T} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} E \frac{T_1}{T} = \frac{\sqrt{2}}{2} E \frac{T_1}{T} \end{aligned} \quad 3-20$$

$$\text{D'où,} \quad T_1 = \sqrt{2} \frac{V_s}{E} \sin(60^\circ - \theta) \cdot T = \frac{\sqrt{6}V_{s\alpha} - 2V_{s\beta}}{2E} \cdot T \quad 3-21$$

Le même calcul sera réitéré pour le reste des 5 secteurs dont les temps d'application des temps T_1 et T_2 sont consignés dans le tableau des impulsions donné ci-après où il sera considéré une impulsion symétrique centrée pour chaque phase. Les instants des temps des vecteurs homopolaires aussi bien pour $V_0(000)$ que $V_7(111)$ sont donnés par l'instant optimal T_0 égal aux deux configurations appliquées tel que $T_0 + T_1 + T_2 = T$ [14].

La conclusion sur SVM sur sa forme algorithmique donnée dans cette section, malgré son formalisme en apparence aisée, est que celle-ci requière énormément de temps calcul en terme d'implémentation, qui risque de compromettre son temps réel, où à chaque fois il est demandé pour une période de commutation de localiser le secteur parmi les six et de reproduire les trois impulsions par secteur et cela par bras d'onduleur [12][16].

3.5 MLI–Vectorielle–« Imaginaire » ou ISVM

En assumant que la fréquence de commutation est suffisamment élevée devant celle de la modulatrice ($f_{port} \gg f_{mod}$) alors le rapport cyclique α dans la relation 3-04 selon la MLI–régulière (avec ou sans porteuse) peut être considérée comme instantanée [16], [22]. Il vient, donc, pour chaque bras de l'onduleur, d'écrire que ce rapport cyclique instantané en temporel est celui sensiblement égal à celui des rapports des tensions de phases tels que:

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_A = \frac{T_{ar}}{T} \cong \frac{V_{AN}}{E} \Rightarrow T_{ar} = \left(\frac{V_{AN}}{E} \right) \cdot T \\ \alpha_B = \frac{T_{br}}{T} \cong \frac{V_{BN}}{E} \Rightarrow T_{br} = \left(\frac{V_{BN}}{E} \right) \cdot T \\ \alpha_C = \frac{T_{cr}}{T} \cong \frac{V_{CN}}{E} \Rightarrow T_{cr} = \left(\frac{V_{CN}}{E} \right) \cdot T \end{cases} \quad 3-22$$

En reconsidérant alors les formulations 3-04 et 3-13, tout en interposant la tension du neutre, il convient d'exprimer la tension complexe de référence de l'onduleur comme suit [12-13][16].

$$\langle \bar{V}_s \rangle = \frac{2}{3T} V_{dc} (T_{ar} + aT_{br} + a^2T_{cr}) \quad 3-23$$

Ainsi pour réduire les difficultés liées à l'utilisation de la SVM mentionnées auparavant, une nouvelle technique de la MLI–vectorielle est dès lors préconisée en se référant aux expressions 3-23 et 3-24. On utilise alors le concept du temps effectif à partir de laquelle la soi-disant modulation de vecteur spatial imaginaire est construite, celle-ci est nommée ISVM, ou en anglais *Imaginary Space Vector Modulation*. Lorsque les tensions de référence instantanées sont négatives selon 3-23, les temps de commutation correspondants deviennent alors négatifs d'où cette appellation ISVM. Par conséquent, ces temps sont appelés des temps de commutation imaginaires.

Cette nouvelle technique est facilement praticable pour la mise en œuvre du contrôle d'une rétroaction numérique sans plus temps de calcul et présente par conséquent un grand avantage pour les commandes en temps réel. Le traitement de l'algorithme peut constituer une première en terme d'implémentation où l'on a à considérer le temps en seconde en ordonnée et en abscisse, soit alors le temps versus temps ! Subséquemment, la technique ISVM emploie seulement les tensions de phase de référence instantanées pour sa mise en œuvre sans estimation de l'angle de

vecteur de référence ni la localisation du secteur, tout sera donc référé à la fréquence de commutation T [11-18]. L'analogie tension-temps permet sur une période de commutation d'écrire en valeur moyenne pour le secteur 1 que

$$\alpha_A = \frac{T_{ON}}{T} = \frac{T_{ar}}{T} = \frac{1}{T} \left(T_1 + T_2 + \underbrace{T_0}_{\text{Temps mort}} \right) \Rightarrow T_{ar} = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2} \quad 3-24$$

Pour éviter la nullité du vecteur $\langle \vec{V}_s \rangle$, la relation 3-25 impose les choix des temps T_{ar} , T_{br} et T_{cr} tels que donnés ci-après, et par la même on en pourra déterminer les temps d'application T_1 et T_2 . Au fait, ces choix constituent une modulation avec une porteuse triangle symétrique comme montré sur la figure 3.8 [20].

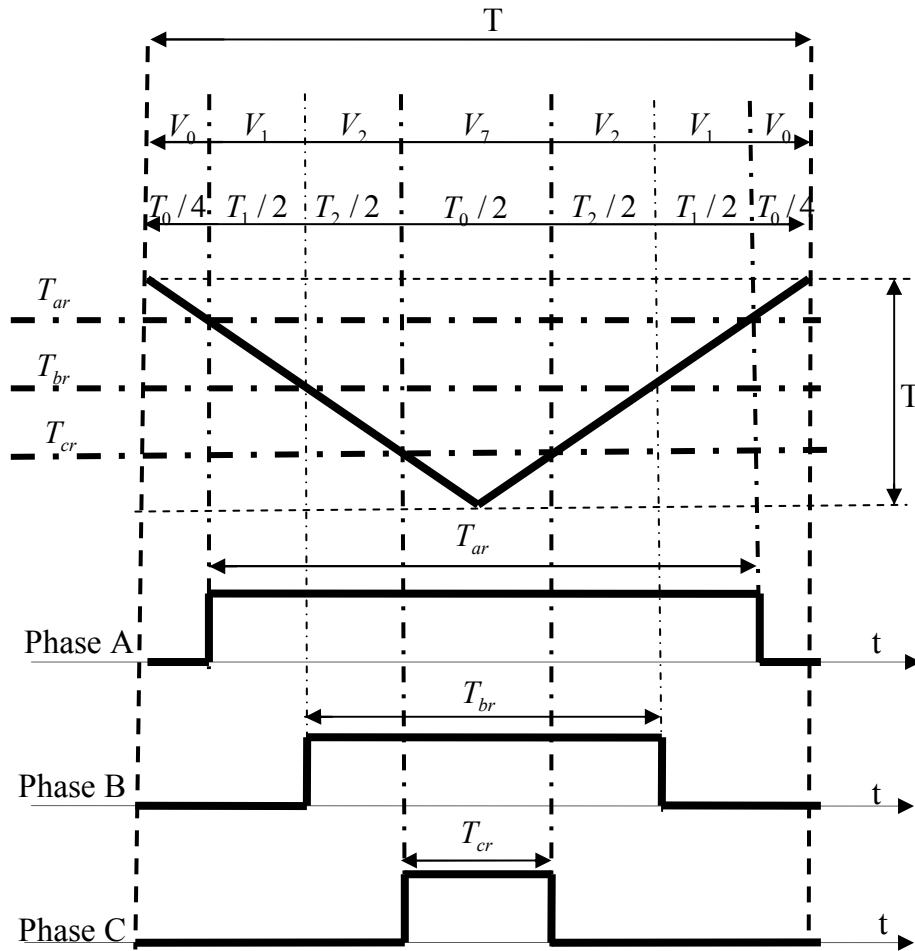


Figure 3.8 Génération d'Impulsions selon ISVM/Secteur 1

$$\begin{cases} T_{ar} = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2} \\ T_{br} = T_2 + \frac{T_0}{2} \\ T_{cr} = \frac{T_0}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T_1 = T_{ar} - T_{br} \\ T_2 = T_{br} - T_{cr} \end{cases} \quad 3-25$$

Comme l'on ne dispose de localisation des secteurs et que la configuration des impulsions du secteur n'est pas identique au secteur 1 telle que indiquée sur la figure 3.7, il convient alors de développer une stratégie de calcul des temps intermédiaires pour chaque période de commutation. Cette stratégie est donnée ci-après par la succession des équations suivantes pour ainsi reconstituer de nouveau les temps de déclenchement des bras de l'onduleur et qui sont notés T_{ga} , T_{gb} et T_{gc} [20-23] [15-16]

- (i) Pour chaque période T , le temps dit effectif T_{eff} peut être calculé par la différence des valeurs maximale $T_{max} = Max(T_{ar}, T_{br}, T_{cr})$ et minimale $T_{min} = Min(T_{ar}, T_{br}, T_{cr})$ par la formule suivante

$$T_{eff} = T_{max} - T_{min} \quad 3-26$$

- (ii) Pour générer le modèle de commutation réel qui préserve le temps effectif, le temps de la séquence zéro des vecteurs nuls doit être joint à la configuration des impulsions

$$T_{0/\gamma} = T - T_{eff} \quad 3-27$$

- (iii) Afin de localiser l'instant effectif, appelé T_{offset} , du centre du temps d'échantillonnage, la tension homopolaire doit être symétriquement répartie au début et à la fin d'une période d'échantillonnage et on écrit :

$$T_{offset} = \frac{T_0}{2} - T_{min} \quad 3-28$$

- (iv) Les temps de déclenchement des bras de l'onduleur T_{ga} , T_{gb} et T_{gc} peuvent déduit comme :

$$\begin{cases} T_{ga} = T_{ar} + T_{offset} \\ T_{gb} = T_{br} + T_{offset} \\ T_{gc} = T_{cr} + T_{offset} \end{cases} \quad 3-29$$

(v) Une fois le point (iv), une simple comparaison temps réel des grandeurs « temporelles en ordonnées » permet la génération triphasée des impulsions pour l'onduleur

Les figures 3.9, 3.10, 3.11 et 3-12, données ci-dessous, illustrent successivement les 5 points du processus de génération impulsions par la technique ISVM dont les ordonnées et les abscisses sont des temps en seconde :

La figure 3.8 incarne le point (i), dont les 3 *subplots* (sinusoïde–temps) du haut les temps « triphasées » T_{ar} , T_{br} et T_{cr} calculés par les rapports cycliques selon les expressions 3-23. Notons bien que ces temps en ordonnées sont négatifs, ce qui dénote l'appellation imaginaire de l'ISVM. Il s'en suit dans les 3 *subplots* du bas, la détermination des temps T_{max} , T_{min} et le temps effectif T_{eff}

La figure 3.9 concerne le point (ii) et (iii), dont en se référant à T_{eff} (déjà donné dans la figure 3.8), présente simultanément le temps mort T_0 selon (ii) dans la *subplot* médiane alors que le temps T_{offset} selon (iii) dans la *subplot* du bas.

La figure 3.10 illustre le point (iv), présentant les modulatrices « temporelles » triphasées des temps de déclenchement et du contrôle des gâchettes des composants de puissances que l'on fait comparer via une porteuse « temporelle » pour générer les impulsions pour les trois bras de l'onduleur.

La figure 3.11 caractérise le point (v), où l'on présente la comparaison temporelle de la modulatrice d'après (iv) avec une porteuse temporelle en dent de scie (inversée) dans la *subplot* d'en haut et enfin dans la *subplot* d'en bas les impulsions générées pour la gâchette de la phase A

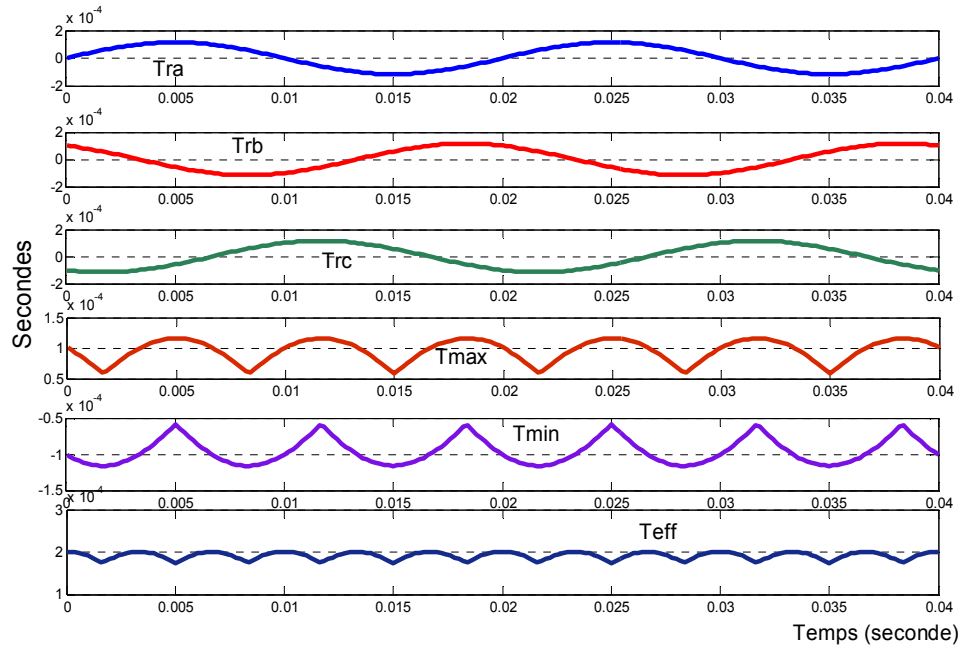


Figure 3.9 Temps versus temps des Tar, Tbr, Tcr, Tmax, Tmin, Teff

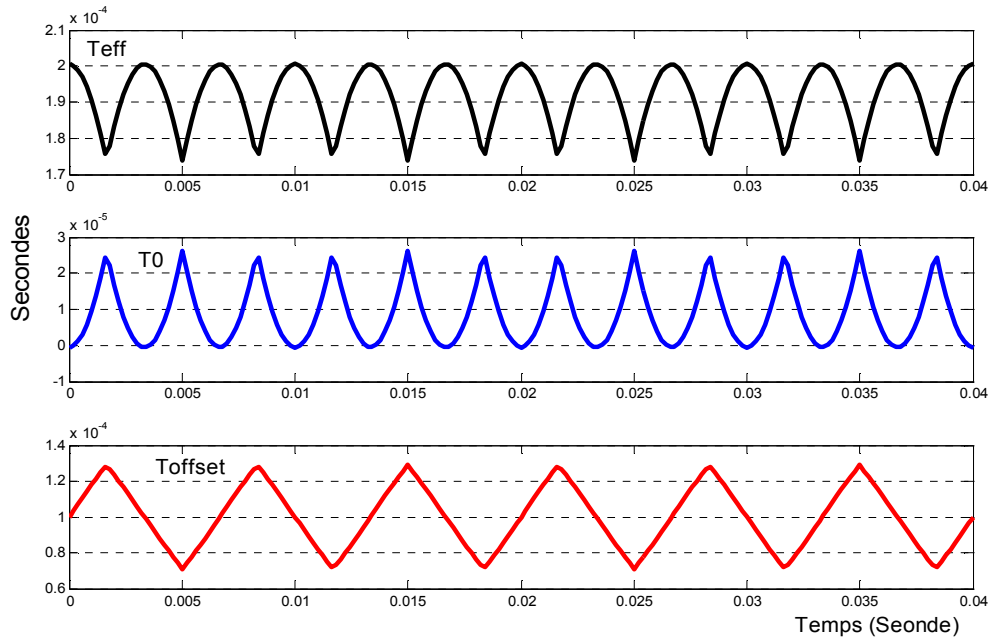


Figure 3.10 Temps versus temps des Teff (effectif), T0 (mort) , Toffset (position)

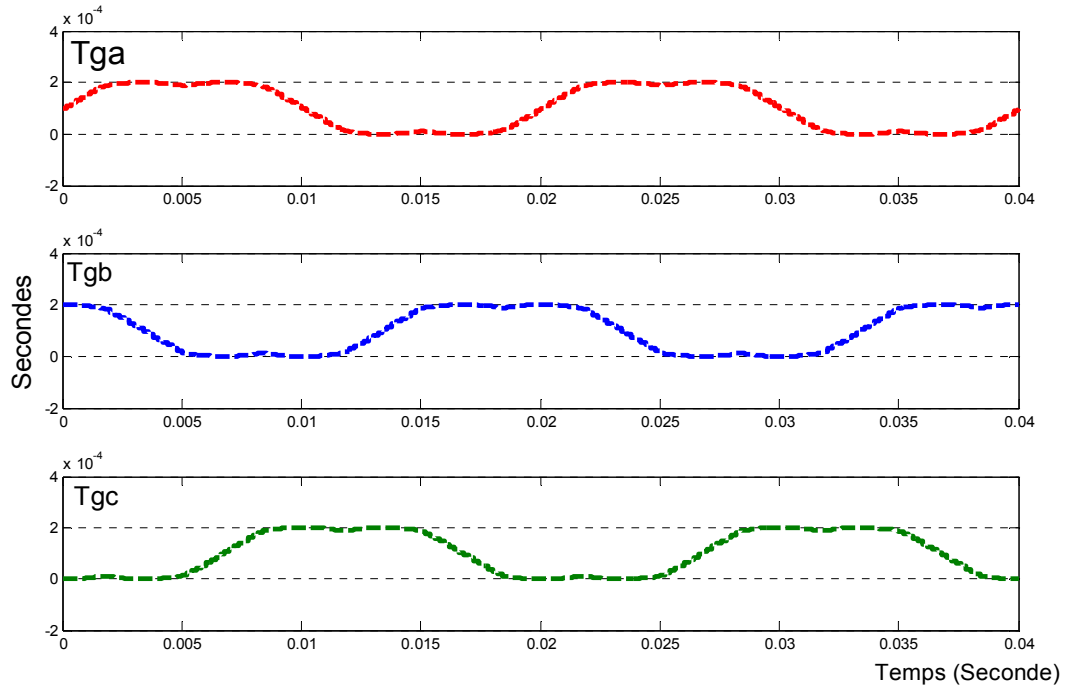


Figure 3-11 Temps versus temps des « modulatrices temporelles » triphasés Tga, Tgb, Tgc

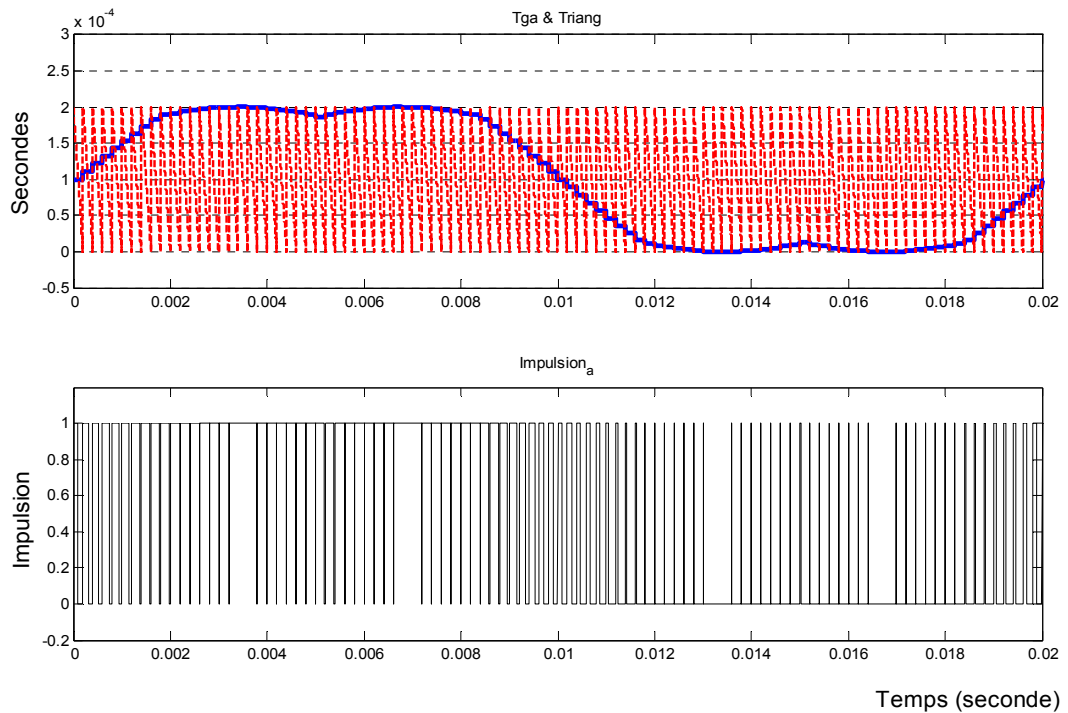


Figure 3-12 Comparaison modulatrice et porteuse temporelle et MLI-ISVM pour la phase A

La figures 3.13 représente respectivement les tensions, selon MLI–naturelle (subplot d'en haut) et ISVM (subplot d'en bas), délivrées par l'onduleur à deux niveaux (en hachées) avec sa référence sinusoïdale (modulatrice) et sa tension restituée par filtrage.

La figure 3.14 montre, comparativement à la référence sinusoïdale 220V/50Hz (modulatrice), les tensions restituées par filtrage selon les dites précédentes MLI. Cela justifie amplement les modulations ainsi utilisées.

Les figures 3.15 et 3.16 représentent respectivement les spectres de fréquence par FFT des tensions onduleurs (hachées) pour les MLI naturelle et ISVM relativement à une phase du triphasé (équilibré), la phase A. Le niveau tension est de 220V/50 Hz avec une commutation à 5 kHz. On remarque bien les paquets répétés de fréquences autour des multiples des fréquences centrales de commutation à 10 kHz, 15 kHz et 20 kHz, etc. Les fondamentaux de 50 Hz apparaît au voisinage de l'origine pour les dites LMI. Selon le THD et l'amplitude maximale de la tension, la MLI-ISVM présente un léger avantage par rapport à la MLI-naturelle, ce qui est consigné dans le tableau 3.3 donné ci-après.

	MLI-ISVM	MLI-naturelle.
THD	2.03%	8.63%
V_{MAX} (Volt)	$310.9 \approx 311 = 220\sqrt{2}$	$292,7 \approx 207\sqrt{2}$

Tableau 3.2. Comparaison MLIs ISVM/Naturelle

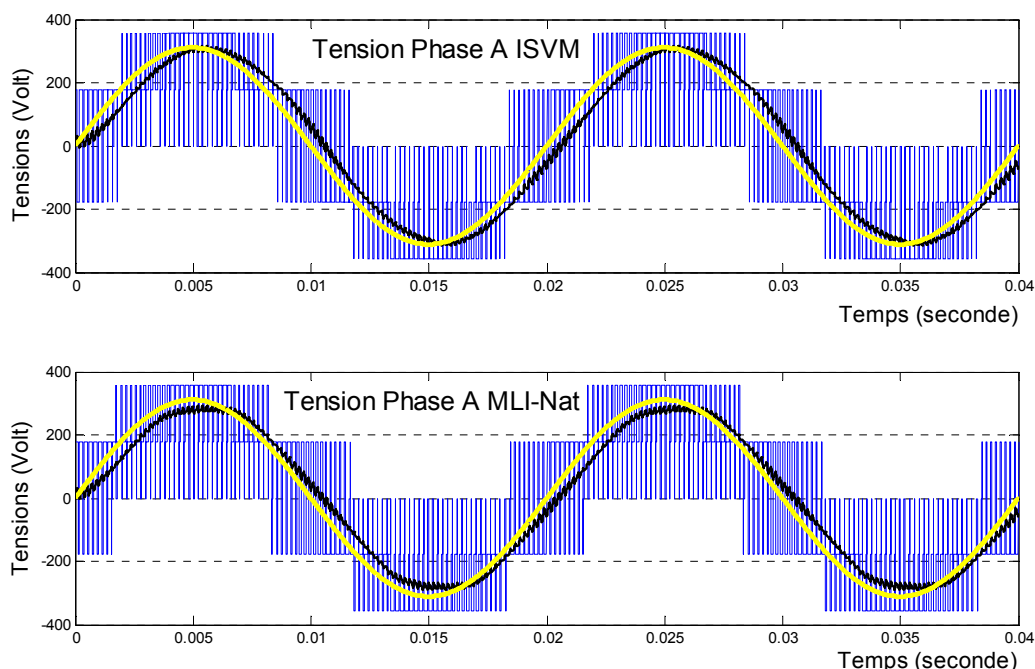


Figure 3-13 Tensions d'ondeur de la phase A, de sa référence en continu & et de sa restituée en « hachée »: S/Fig.– haut ISVM, S/Fig.–bas MLI-Naturelle

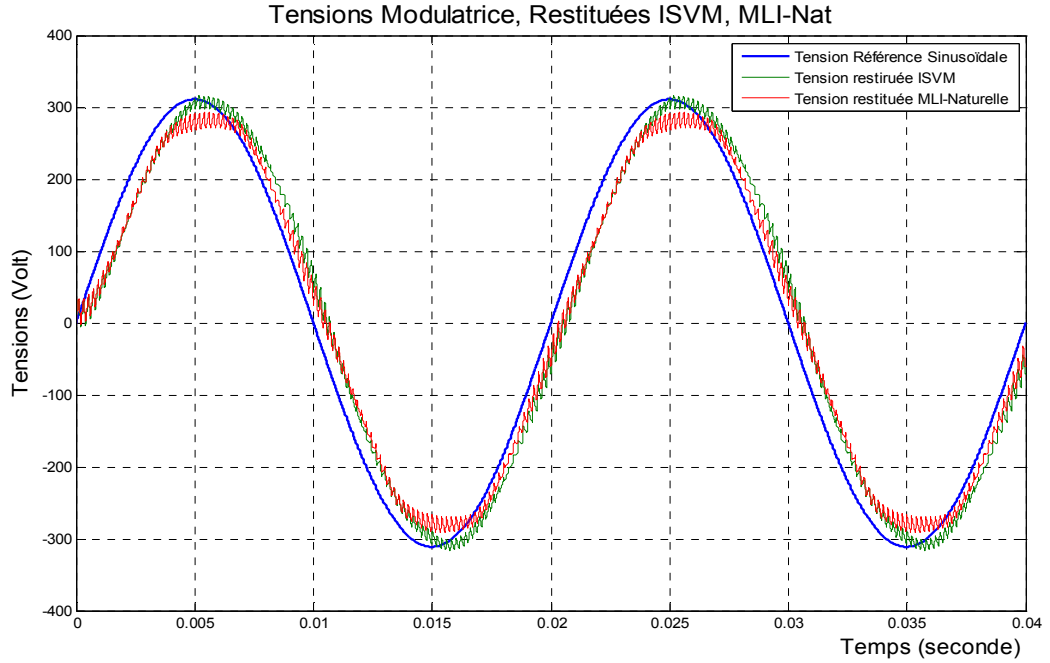


Figure 3-14 Tensions de référence en continu & les 2 restituées en « hachée » selon ISVM, & MLI-Naturelle

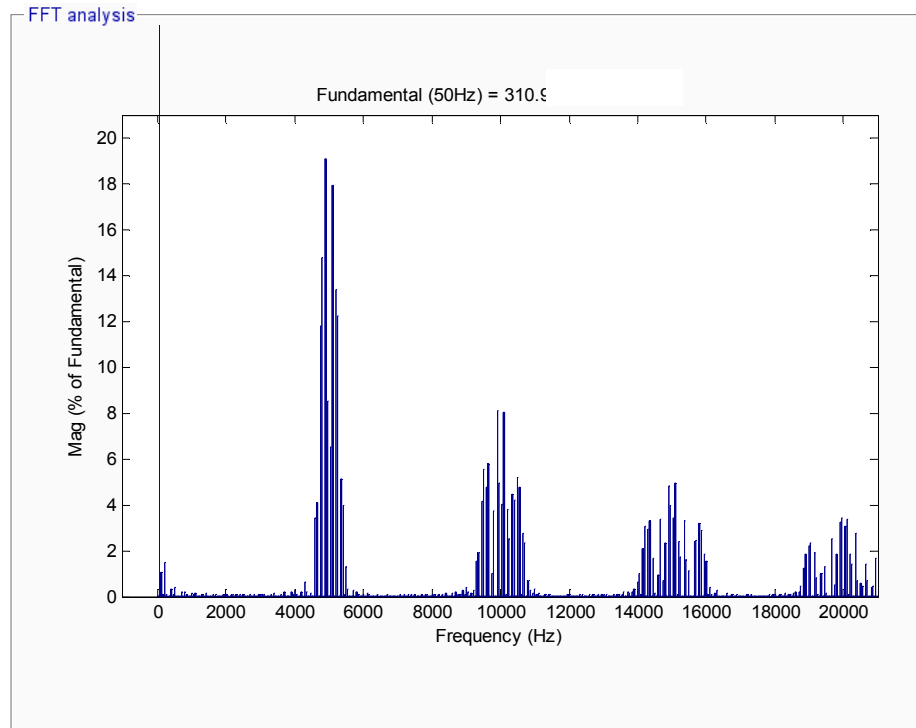


Figure 3-15 Spectre harmonique, pour le cas ISVM, de la phase A — fréquence de commutation à 5kHz & fréquence de la modulatrice à 220V/50 Hz

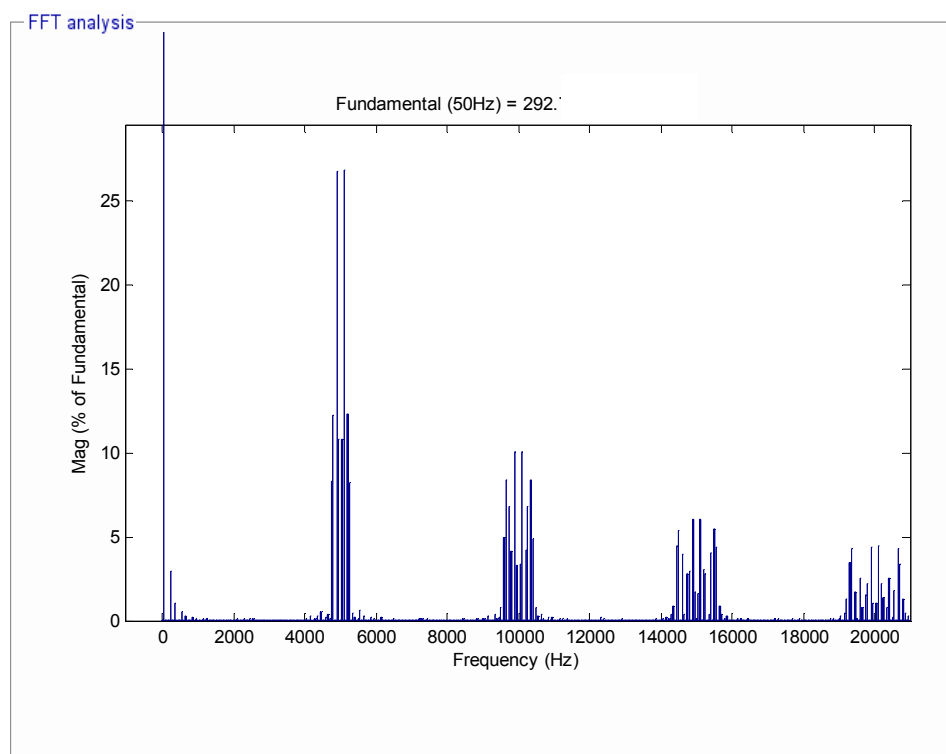


Figure 3-16 Spectre harmonique, pour le cas MLI–Naturelle, de la phase A — fréquence de commutation à 5kHz & fréquence de la modulatrice à 220V/50 Hz

3.6 Conclusion

A travers ce chapitre, il a été question d'exposer une technique de modulation vectorielle de la largeur d'impulsion un peu particulière car portant en son sein le mot Imaginaire dans son abréviation ou ISVM (Imaginary Space Vector Modulation). En effet, on a à faire avec une implantation où le calcul tourne autour des grandeurs dimension temps versus temps pour générer les impulsions pour la commande des gâchettes de l'onduleur. Son implémentation temps réel est remarquable sans aucun appel contraignant des sous-routines de calcul bouclé de la génération des impulsions et sans avoir aucunement recours de localiser les six secteurs, la période de commutation est amplement suffisante. Ainsi dire, l'usage du global complexe 2D est d'une importance capitale pour gagner à la fois en temps de calcul et aussi sans perdre l'amplitude de la tension de référence sinusoïdale (modulatrice) à la sortie de l'onduleur avec un THD relativement réduit. Ceci, en effet, nous pourra être que réconfortant dans le sens de gagner du terrain en terme de commande en temps réel de l'actionneur asynchrone, en l'occurrence la génératrice double et simple alimentée, dans la récupération de l'énergie électrique sous forme primaire éolienne. Ce qui est sera dans le chapitre suivant.

3.7 Références bibliographiques

- [1] J. Holtz, "Pulsewidth Modulation – A survey", IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol.39, No.5, Oct. 1992
- [2] G. Segulier, F. Labrique, 'Les convertisseurs de l'électronique de puissance- la conversion continu/alternatif, Tome 4, Lavoisier/Tec. et Doc., Paris 1989
- [3] J. Holtz, A.M. Khambadkone, "Pulse Width Modulation for Controlled AC Motor Drives - accompanying remarks for 1993 EPE Tutorial", EPE Brighton, U.K, 12 Sep. 1993
- [4] H.W. Vander Broeck, H.C. et all, "Analysis and realisation of a pulse width modulator based on voltage space vector," IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 24, pp.142-150, Jan/Feb, 1988
- [5] J.M. D. Murphy, Michael G. Egan, "A comparaison of PWM strategies for inverter-fed induction motors," IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. IA-19, N°3, May-June, 1983.
- [6] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, L. Zarri, "Analysis of the current ripple in induction motor drives controlled by SVM technique", EPE, 1999
- [7] S. L. Capitaneanu, Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux, Thèse de Doctorat soutenue à l'institut national polytechnique de Toulouse, Novembre 2002
- [8] B.K. Bose, "An Adaptative Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.37, No.5, Oct. 1990, pp.402-408
- [9] Q. M. Attique, et all, "A survey on space-vector pulse width modulation for multilevel inverters", [Transactions on Power Electronics and Applications](#) (Vol2 Nov. 2017, pp. 226 - 236
- [10] E. A. R. Engku Ariif et all A Space Vector PWM Technique for a Three-Level Symmetrical Six-Phase Drive, [IEEE Transactions on Industrial Electronics](#) (Volume: 64, 01 June 2017 , pp. 8396 - 8405
- [11] S. Ogasawara, "A Novel PWM Scheme of Voltage Source Inverters Based on Space Vector Theory", EPE, 1989

- [12] Dae-Woong Chung, Joohn-Sheok Kim, Seung-Ki Sul, “Unified voltage modulation technique for real-time three-phase power conversion”, IEEE Trans. Ind. Applicat., 34, 2, pp. 374–380, 1988
- [13] H. W. van der Broeck and all, “Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage - Space Vectors”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24. N° 1. , pp. 150-142, Jan./Feb. 1998
- [14] Keliang Zhou and Danwei Wang “Relationship Between Space-Vector Modulation and Three-Phase Carrier-Based PWM: A Comprehensive Analysis,” IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 49, N° 1, pp. 196-186, February 2002
- [15] Carlos Canudas de Wit, Modélisation, contrôle vectoriel et DTC : Commande des moteurs asynchrones, tome 1, Edition Hermes, Paris, 2000
- [16] J.T. Boys, P.G. Handley, “Harmonics analysis of space vector modulated PWM waveforms”, IEE Proceedings, Vol.137, Pt. B, No.4, July 1990
- [17] S.L. Capitaneanu, B. de Fornel, et all, “General and Algebraic Synthesis for PWM Methods”, EPE Journal, vol. 11, No. 3, 2001,pp. 16-28
- [18] S.R. Bowes, B.M. Bird, "Novel Approach to the Analysis and Synthesis of Modulation Processes in Power Converters", Proceedings of IEE, Vol.122, No.5, 1975, pp.507-513
- [19] G. Grellet, G. Clerc, Actionneurs électriques – Principes, Modèles –commande, Edition Eyrolles, Paris, 1997
- [20] N. Celanovic, D. Boroyevich, “ A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters,” IEEE Transactions on Industry., Vol. 37, Mar/Apr 2001, pp. 637 - 641
- [21] J. –P. Caron , J. –P. Hautier, “Modélisation et commande de la machine asynchrone”, Edition Technip, Paris, 1995
- [22] N. Mekkaoui, M. –S. Naït-Saïd, “Direct S-power control for a doubly fed inductions generator, ”Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg. Vol. 62, 4, pp. 365–370, Bucarest, 2017

Chapitre 4

COMMANDE "S-PUISSANCE " D'UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTÉE CONNECTÉE AU RÉSEAU

**("S-POWER" CONTROL OF A DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR
-DFIG- CONNECTED TO THE GRID)**

4.1 Introduction

Les éoliennes à base des Génératrices Asynchrones Double Alimentée (GADA), ou en anglais *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)*, fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

C'est l'introduction des convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau qui donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique entraînée à vitesse variable. Parallèlement, des commandes spécifiques permettent un découplage des variables contrôlées par l'utilisation de repères appropriés. Parmi ces commandes, celles qui sont appelées commandes vectorielles par orientation du flux (statorique ou rotoriques),

en anglais *Field Oriented Control* ou "*FOC*", et qui sont largement utilisées en assurent des performances dynamiques équivalentes à celles obtenues par la machine à courant continu [1].

Malgré les performances apportées par ces commandes vectorielles, des inconvénients inhérents à leurs propres conceptions, essentiellement basées sur la modélisation de la machine, peuvent affecter ces performances dans certaines applications dont à titre d'exemple l'influence des variations paramétriques dans la *FOC*. Ainsi, les performances se dégradent lorsque les paramètres réels de la machine s'écartent des valeurs utilisées dans le système de contrôle.

Il surgit notamment, que le développement des nouvelles techniques de traitement des signaux nt donné lieu à la réalisation de stratégies de régulation entièrement inédites, dont les plus en vues sont celles regroupées sous le terme du contrôle direct du couple électromagnétique "*DTC*" (*Direct Torque Control*) [2-3]

La commande dite *DTC* des machines à induction offre une alternative à la commande vectorielle par la réduction accrue de l'utilisation du nombre de paramètres du modèle de la machine et notamment par la simplification de ses algorithmes [4], [5]. La méthode *DTC* contrôle directement le couple et le flux de la machine en sélectionnant des vecteurs de tension à partir d'une table de vérité en utilisant les informations, généralement observées, sur le flux et le couple du stator.

4.2 Dérives paramétriques

4.2.1 Dérives paramétrique dans la commande *FOC*

Concernant les stratégies de commande, la littérature permet de remarquer que la principale stratégie utilisée est le contrôle vectoriel par orientation soit du flux statorique soit de la tension statorique. Dès lors, en terme de puissance, le principal objectif demeure celui de contrôler indépendamment les puissances active et réactive, tant au stator qu'au rotor. La principale difficulté de la mise en oeuvre de la commande *FOC* du moteur/ génératrice asynchrone double alimentée MADA, GADA est liée au contrôle du flux dans la machine, en raison de la difficulté de mesure directe et qui fait le recours à son estimation. Cette dernière dépend du modèle de la machine asynchrone par ces deux modes de fonctionnement en MADA (Moteur) ou en GADA (générateur).

On s'intéresse aussi aux performances de la MADA ainsi qu'à sa stabilité et à la robustesse de la stratégie de commande face aux variations paramétriques de la machine. Ces études proposent des

contrôles avec ou sans capteur de position et de vitesse en utilisant différentes méthodes d'estimation de la vitesse ou de la position du rotor de la machine. Pour garantir de bonnes performances en régime dynamique et statique de la commande vectorielle, il est nécessaire de concevoir une régulation robuste et insensible aux variations paramétriques, notamment celles de la résistance rotorique qui demeure le paramètre clé dans la commande FOC [6-7]. Dans ce cadre on peut citer :

R. Datta [8] propose une commande sans capteur de position et de vitesse d'une GADA dédiée à une application éolienne. Il s'agit d'une commande vectorielle par orientation du flux statorique. L'algorithme permettant l'estimation de la position est fait à partir des courants statorique et rotorique et des tensions statoriques. L'estimation de la position lui permet par la suite d'estimer le flux statorique. Les avantages de cette méthode d'estimation sont : la faible dépendance vis-à-vis des variations paramétriques de la machine, l'estimation de la position sans connaissance préalable de la position initiale du rotor et de bonnes performances de la machine pour un fonctionnement à vitesse synchrone c'est-à-dire pour une fréquence du rotor nulle.

R. Cárdenas [9], propose une commande d'une GADA sans capteur de vitesse alimentant une charge isolée. La stratégie de commande utilisée est un contrôle vectoriel par orientation du flux statorique. L'estimation de la vitesse utilise la technique *MRAS (Model Reference Adjustable System)* utilisant les courants du stator et ceux du rotor et les tensions du stator. Il présente des résultats expérimentaux d'essais effectués sur une machine de 2.5 kW en comparant entre autres la vitesse réelle et la position réelle du rotor avec celles observées avec des erreurs statiques maximales de 1%. Ses conclusions témoignent des bonnes performances de la stratégie qu'il présente qui sont équivalentes aux performances obtenues avec un capteur de position.

Dans [10], il étudie la commande par orientation du flux statorique d'une MADA alimentée par deux cycloconvertisseurs, l'un au stator et l'autre au rotor. L'application visée est la métallurgie. La magnétisation de la machine est effectuée par le rotor. Il contrôle ainsi le facteur de puissance du stator et du flux statorique. Par la suite, il étudie le dimensionnement des convertisseurs du stator et du rotor afin d'optimiser leur coût en réduisant la plage de variation des fréquences des tensions qu'ils fournissent grâce à la loi de répartition des puissances. Il se base sur une puissance apparente de dimensionnement calculée pour une application MADA, pour une application machine à cage et pour des machines identiques dans les deux cas. Il distingue deux cas de fonctionnement : fonctionnement pour une vitesse variant de 0 à la vitesse nominale et un fonctionnement en

survitesse sans démagnétisation. Il conclut que dans les deux cas la puissance apparente totale (convertisseur stator + convertisseur rotor) pour une MADA est toujours inférieure au cas d'une machine à cage (de l'ordre de 55% pour le convertisseur du stator et de 59% pour le convertisseur du rotor) ; ce qui représente un autre avantage pour la MADA. Il donne des résultats expérimentaux de la commande présentée. Ses principales conclusions confirment la faisabilité d'une telle configuration où les performances dynamiques de la MADA sont comparables à celles de la machine à cage. La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance notamment ceux exigeants un large domaine de fonctionnement étendue à puissance constante.

Dans [11], on propose une loi de commande pour la *MADA/GADA* sur la double orientation des flux du stator et du rotor en leur imposant une orthogonalité entre eux pour disposer d'une commande linéaire et découplée de la machine, afin de surmonter l'instabilité de la machine *lors des variations paramétriques* et aussi le problème d'instabilité de la dite machine rencontré en boucle ouverte. L'auteur présente une prospection concernant son choix d'un modèle tout flux de la machine en vue de sa commande dans sa plus simple expression. Le long de son travail, il s'est basé sur la proposition de la double orientation des flux qui a donné théoriquement un couple développé optimal (*Torque Optimisation Factor TOF*). Cette stratégie de la double orientation des flux fut dès lors l'objet de diverses commandes. La première par des contrôleurs PI en l'orthogonalité des flux. La deuxième par une commande non linéaire avec retour d'état linéarisant. Il étudie par la suite la justification d'emploi des deux convertisseurs au stator et au rotor pour optimisation de l'énergie. Il conclut que le *TOF*, s'avère indispensable pour pouvoir utiliser la commande de la MADA tout flux. L'inconvénient de la commande vectorielle double orientation du flux reste l'usage de deux convertisseurs, ce qui pourrait être conventionnellement justifié par le coût de l'application et par les puissances mises en jeu.

4.2.2 Dérives paramétrique dans la commande DTC

Un problème avec le schéma DTC de base est que ses performances se détériorent au démarrage et à basse vitesse. Les méthodes proposées pour résoudre ce problème comprennent l'utilisation d'un signal de vibration [2], une table de commutation modifiée pour appliquer les vecteurs de tension

disponibles dans la séquence appropriée [5], ou des techniques prédictives. Un autre problème pour *DTC* est la variation de fréquence de commutation du convertisseur qui complique considérablement la conception du circuit de puissance. La bande passante du contrôleur d'hystérésis doit être choisie avec soin.

L'approche de la stratégie de *DTC* modifiée proposée, incorporant la modulation vectorielle de l'espace (SVM), ont été utilisées pour obtenir une fréquence de commutation constante [12] - [15]. Les cycles de commutation de l'onduleur dans [12] ont été calculés directement sur la base des erreurs de couple et de flux dans chaque période d'échantillonnage, tandis que dans [13] et [14], ils sont générés à partir des contrôleurs PI. Le vecteur de tension de sortie a été sélectionné dans [13] en utilisant la table de commutation *DTC* conventionnelle mais la durée du vecteur de tension a été déterminée par la stratégie minimale d'ondulation de couple. Bien que les fréquences de commutation soient constantes au même titre que les stratégies *DTC*, des inconvénients supplémentaires ont été introduits, tels qu'un calcul en ligne compliqué [13], des paramètres du régulateur PI [13], [14], et robustesse faible sur les variations paramétriques de la machine [13] - [15].

Dans notre approche, les contrôleurs de puissance active et réactive et la modulation *ISVM* (*Imaginary Space-Vector Modulation*, voir chapitre 3) sont combinés pour remplacer les contrôleurs d'hystérésis utilisés dans les variateurs *DSPC-GADA* proposés. Avec l'utilisation de la technique *ISVM*, nous bénéficions des deux avantages tels que le peu de temps de calcul pour sa mise en œuvre numérique et pour sa fréquence de commutation fixe de l'onduleur. De là, il résulte une fréquence de commutation fixe du convertisseur de puissance en utilisant un algorithme simple et lisse qui diminue le contenu des harmoniques.

En premier lieu, ce chapitre présente dans sa première partie une brève étude sur la stratégie de régulation par un simple contrôle scalaire en boucle fermée (BF) de la tension aux bornes du stator de la GAS pour son utilisation dans un système éolien fonctionnant à vitesse fixe connectée à des charges variables en garantissant une tension générée constante.

Dans un second lieu, on introduit dans sa première partie, un algorithme de commande découplé des puissances actives et réactives de la GADA sous différentes versions. La deuxième partie est consacrée à deux nouvelles approches de commandes directes et découplées des puissances adoptées et formulées sous forme complexe. La première approche concerne une

commande par retour d'état complexe pour une GADA (Génératrice Asynchrone Double Alimentée) alimentant un site isolé et la seconde approche est celle inspirée d'une *DTC (Direct Torque Control)* où le contrôle des puissances actives et réactives est réalisé sous sa forme apparente ou S-Puissance, en anglais *S-Power*, qui s'effectuera via une modulation de la largeur d'impulsion vectorielle particulière, appelée *ISVM (Imaginary Space-Vector Modulation)* dont des résultats de simulations seront aussi exposés par la suite.

4.3 Commande scalaire de la GAS

4.3.1 Description du Système de régulation

La figure 4.1 présente de la configuration le schéma bloc global du modèle simplifié, pour le contrôle scalaire de tension de la GAS le rotor de sette GAS triphasé est entraîné par une éolienne à vitesse- constante et le stator connecté sur une charge inductive permettant d'obtenir un fonctionnement purement autonome. La stratégie de contrôle de la tension aux terminaux du stator lors des variations de vitesse non souhaitées induit des perturbations dans la tension générée. On adopte ainsi une méthode de compensation d'énergie réactive en utilisant un compensateur statique (SVC: Static VAR Compensator) qui se compose d'un gradateur sur charge purement inductive (TCR: Thyristor Controlled Reactor) en parallèle avec des bancs de condensateurs commutables (TSC : Thyristor Switched Capacitors), de façon à créer une source d'énergie réactive variable avec un banc de condensateurs à excitation fixe. Un régulateur du type PI est utilisé dans le système du contrôle en boucle fermée afin de régler la tension produite aux terminaux de la GAS [16-18].

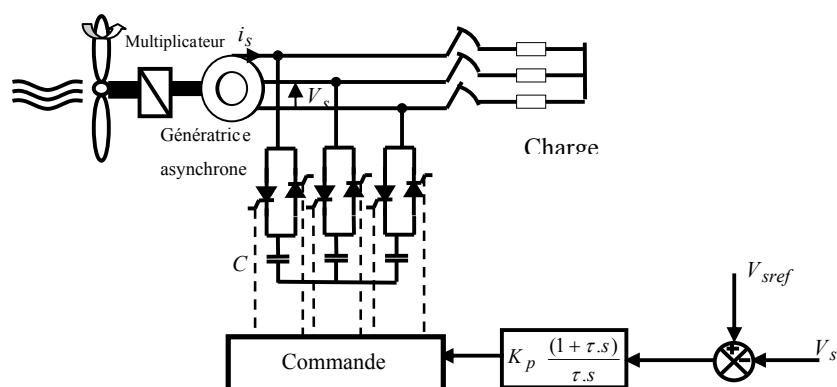


Figure 4-1. Le schéma du contrôle de tension de la GAS.

4.3.2 Résultats de simulation

Dans cette section, on va simuler le comportement de la génératrice asynchrone en commande bouclée à différentes vitesses du rotor. Le profil de vitesse du rotor est comme suit : A $t=0$ s, un échelon de vitesse de 140rd/s est appliqué, puis à $t=5$ s un échelon de 160rd/s ($t=5$ s) lui succéda. Plutard à $t=10$ s, un autre échelon de 150rd/s est appliqué.

L'horizon de simulation est de 15 s. Sur les figures 4.2, on enregistre les constatations suivantes :

- À vide à 140 rd/s, pour $0 \leq t \leq 5$ s, le mode de fonctionnement de la génératrice est hypo synchrone et l'auto-amorçage aboutit après de 1 s. La tension et le courant statoriques évoluent sans dépassement.

Pour $5 \leq t \leq 10$ s, la *SEIG* est chargée avec un accroissement important de la charge inductive. Les résultats de simulation sont illustrés dans les figures 4.2 (a), (b) et (c) et duquel on fait varier *P_{ch}* (la puissance active de la charge) et on fixe la valeur de *Q_{ch}* (*Q_{ch}* =300Var). On enregistre les constatations suivantes :

Pour $400 \leq P_{ch} \leq 1180$ W, une diminution de la tension et de la puissance réactive de la GAS à l'instant $t=5$ s de l'introduction de la charge. Nous constatons donc en observant la figure 4.2 plus la charge est importante plus la chute de tension aux bornes du stator est importante. En contrepartie, la commande réussit à réguler la tension et à rejeter la perturbation qui est due au changement de la charge inductive.

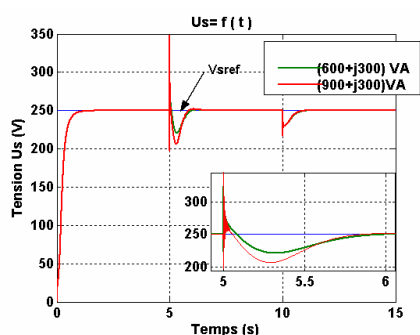


Figure 4-2 a) allure de l'enveloppe de la tension statorique pour des charges variables

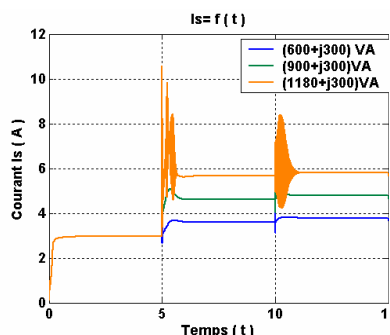


Figure 4-2 b) allure de l'enveloppe du courant statorique pour des charges variables

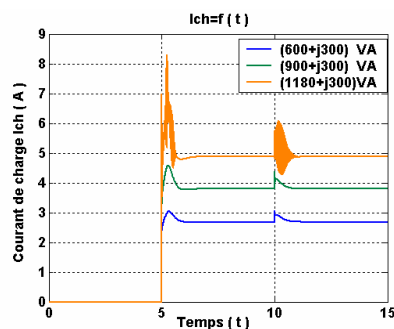


Figure 4-2 c) allure de l'enveloppe du courant de charge pour des charges variables

En terme d'amélioration de performances pour des aérogénérateurs connectés aux réseaux, il sera plus adéquat d'utiliser la machine asynchrone à rotor bobiné dont le rotor est contrôlé via un convertisseur permettant de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau par une commande découplée des puissances active et réactive. Ce qui fera l'objet de la deuxième partie de ce chapitre.

4.4 Commandes vectorielles de la GADA

Elles sont établies à partir du modèle complexe 2D de Park donné au chapitre 2 de la GADA. Nous rappelons dans cette section les équations tensions et flux en écriture complexes, avec vecteur d'état tout courant, sous forme matricielle comme suit :

Tensions,

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_S \\ \bar{v}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S + s \cdot L_S + jM\omega_S & s \cdot M + jL_S\omega_S \\ s \cdot M + jL_R\omega_R & R_R + s \cdot L_R + jM\omega_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_S \\ \bar{i}_R \end{bmatrix} \quad 4-1$$

Flux,

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_S \\ \bar{i}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sigma L_S & (\sigma-1)/\sigma M \\ (\sigma-1)/\sigma M & 1/\sigma L_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\phi}_S \\ \bar{\phi}_R \end{bmatrix} \quad 4-2$$

Où $s = \frac{d}{dt}$ est l'opérateur de dérivation de Laplace et $j = \sqrt{-1}$

$\sigma = 1 - M^2/(L_S L_R)$: Coefficient de dispersion total du flux de fuites

Et $\forall \bar{x} = \text{tension, courant, flux} \mapsto \bar{x} = x_d + jx_q$ (d, q : indices direct et quadrature de Park)

Avec, les pulsations du stator ω_S et du rotor ω_R qui sont liées à la vitesse du rotor Ω par :

$$\omega_S = \omega_R \pm p \cdot \Omega \quad ; \quad \omega_S = g \cdot \omega_R \quad 4-3$$

Les paramètres R_S, R_R, L_S, L_R, M, p et g apparaissant dans les équations 4-1, 4-2 et 4-3 sont respectivement, selon les indices "S" du stator et "R" du rotor, les résistances, les self-inductances, la mutuelle, le nombre de paire de pôles et le glissement. Les puissances active et réactive du côté

statorique sont données par les expressions suivantes:

$$\begin{aligned} P_S &= \Re(\bar{v}_S \cdot i_S^*) = v_{Sd} i_{sd} + v_{Sq} i_{sq} \\ Q_S &= \Im(\bar{v}_S \cdot i_S^*) = v_{Sq} i_{sd} - v_{Sd} i_{sq} \end{aligned} \quad 4-4$$

Afin de garantir un fonctionnement optimal de la GADA avec un facteur de puissance unitaire. Dans les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone. On fait, appel à des stratégies de commande qui permettent un découplage entre les puissances statoriques active et réactive, ces stratégies de commande feront l'objet de la partie ci-après.

4.4.1 Banc à flux statorique orienté d'une GADA

Le modèle mathématique de la GADA dédié à la commande la commande vectorielle par orientation du flux statorique (CV-OFS) est lié au champ tournant principal du stator. Les hypothèses considérées pour les aérogénérateurs asynchrones de moyennes et grandes puissances supposent que la résistance du stator est négligeable en tenant compte de la double contrainte simultanée de l'orientation du flux et de la tension du côté stator (tension en amplitude et en fréquence sont imposés par le réseau). Ces contraintes données ci-après dans 4-5-a conduisent aux équations d'état du rotor caractérisant la commande en boucle ouverte telles que formulées dans 4-5-b [19].

$$\begin{cases} \bar{v}_S = 0 + jv_{Sq} = jV_S ; (v_{Sd} = 0) \\ \bar{\phi}_S = \phi_{Sd} + j0 = \phi_S ; (\phi_{Sq} = 0) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_{Sd} = d\phi_S / dt = 0 \\ v_{Sq} = V_S = \omega_S \phi_S \Rightarrow \phi_S = V_S / \omega_S \\ i_{Sd} = -(M / L_S) i_{Rd} + \phi_S / L_S \\ i_{Sq} = -(M / L_S) i_{Rq} \end{cases} \quad 4-5-a$$

$$\begin{cases} v_{dR} = R_R i_{Rd} + L_R \sigma \frac{di_{dR}}{dt} - g \omega_S L_R \sigma i_{qR} \\ v_{qR} = R_R i_{Rq} + L_R \sigma \frac{di_{qR}}{dt} - g \omega_S L_R \sigma i_{dR} + g \frac{M v_S}{L_S} \end{cases} \quad 4-5-b$$

Cela amène à contrôler les puissances active et réactive du stator par les courants du rotor conformément aux équations 4-6 et par la même par les composantes des tensions du rotor v_{Rd} et v_{Rq} , ce qui est illustré par le schéma block de la figure 4.3 caractérisant une commande vectorielle non linéaire des puissances d'une GADA connectée au réseau en boucle ouverte (BO). Notons la

présence des termes de couplages $g\omega_s\sigma L_R$ entre les axes de commandes des puissances qui peuvent être compensés en les considérant comme des perturbations pour pouvoir réaliser une commande vectorielle découplée des puissances. Une structure par boucles imbriquées sera utilisée pour pouvoir contrôler indépendamment les puissances Q_S et P_S par des régulateurs classiques du type *PI*. A cet effet, deux modes de contrôle différentes sont proposées : Commandes vectorielles directe et indirecte des puissances Q_S et P_S .

$$\begin{cases} P_S = -V_S \frac{M}{L_S} i_{Rq} \\ Q_S = -V_S \frac{M}{L_S} i_{Rd} + V_S \frac{\phi_{Sd}}{L_S} = -V_S \frac{M}{L_S} i_{dR} + \frac{V_S^2}{L_S \omega_S} \end{cases} \quad 4-6$$

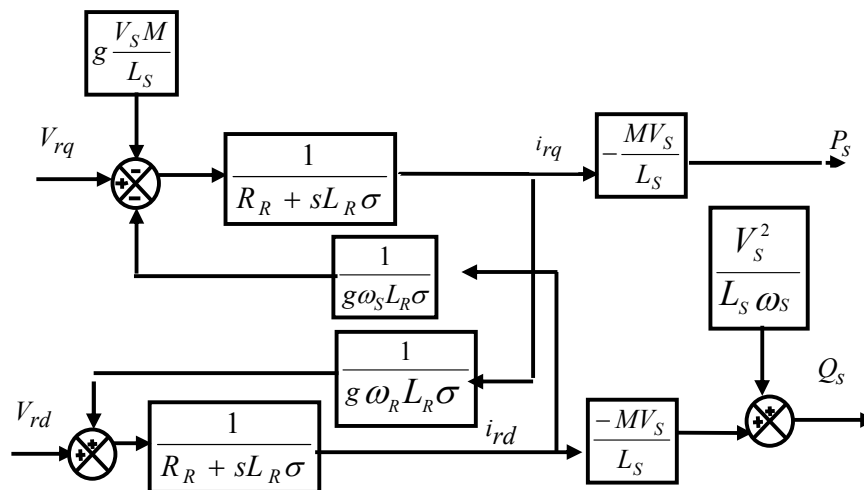


Figure 4-3 Schéma bloc de la GADA sous les contraintes du flux et de la tension orientés

4.4. 2 Commande vectorielle directe des puissances

La stratégie de cette commande vectorielle directe est réalisée en boucle fermée (BF) sur les puissances tout en négligeant complètement les termes de couplages mentionnés précédemment. Ainsi, les équations de commande des puissances seront successivement données comme ci-après. En outre le schéma block de la figure 4.4 illustre ce cas de la dite commande directe où le contrôle

BF des puissances active et réactive est réalisé moyennant les régulateurs $C_q(s)$ et $C_d(s)$ qui peuvent être des PI.

$$\begin{cases} v_{dR} = R_R i_{Rd} + L_R \sigma \frac{di_{dR}}{dt} \\ v_{qR} = R_R i_{Rq} + L_R \sigma \frac{di_{qR}}{dt} + g \frac{MV_S}{L_S} \end{cases} \quad 4-7$$

$$\begin{cases} v_{dR} = -R_R \frac{L_S}{V_S M} Q_S - \frac{M\sigma}{\sigma-1} \frac{dQ_S}{dt} - \frac{V_S R_R}{\omega_S M} \\ v_{qR} = -R_R \frac{L_S}{V_S M} P_S - \frac{M\sigma}{\sigma-1} \frac{dP_S}{dt} + g \frac{MV_S}{L_S} \end{cases} \quad 4-8$$

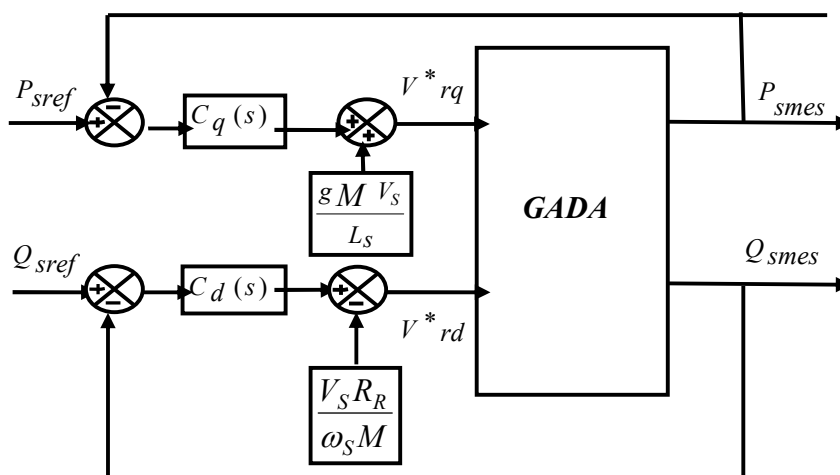


Figure 4-4 Schéma block de la CV directe des puissances d'une GADA

4.4.3 Commande vectorielle indirecte des puissances en « P-BO » & « I-BF »

L'algorithme de la commande indirecte, contrairement à la commande précédente, tient en compte les termes de couplages, qui seront compensés par leurs termes semblables ainsi reconstitués pour réaliser un contrôle découplé de puissances active et réactive indirecte où ces dernières sont commandées boucle ouverte (P-BO) alors que les composantes des courants du rotor en boucle fermés via (I-BF). Cela étant illustré par le schéma block de la figure 4.5.

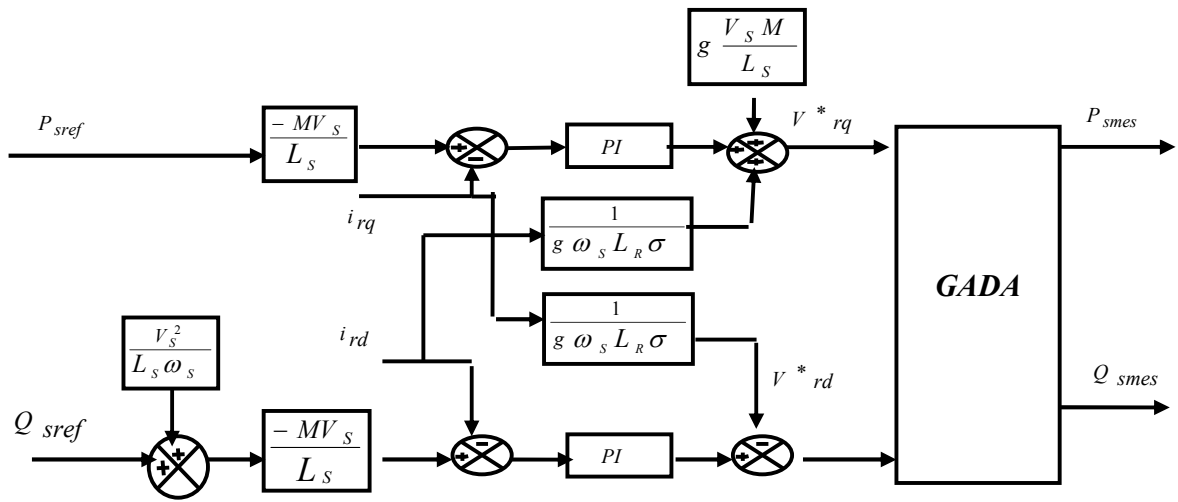


Figure 4-5. Schéma block de CV indirecte des puissances en P-BO & en I-BF

4.4.4 Commande vectorielle indirecte des puissances en « P-BF » & « I-BF »

Par rapport au cas précédent, le schéma block de la présente commande vectorielle indirecte des puissances est réalisée avec deux boucles fermées sur les puissances et les composantes du courant du rotor, soient en abrégé P-BF et I-BF. CV, ce qui est montré sur la figure 4.6. De ce fait, la commande par boucle interne du contrôle des courants du rotor peut être considéré pour des raisons de sécurité de fonctionnement de la GADA en lui consignait un profil convenable.

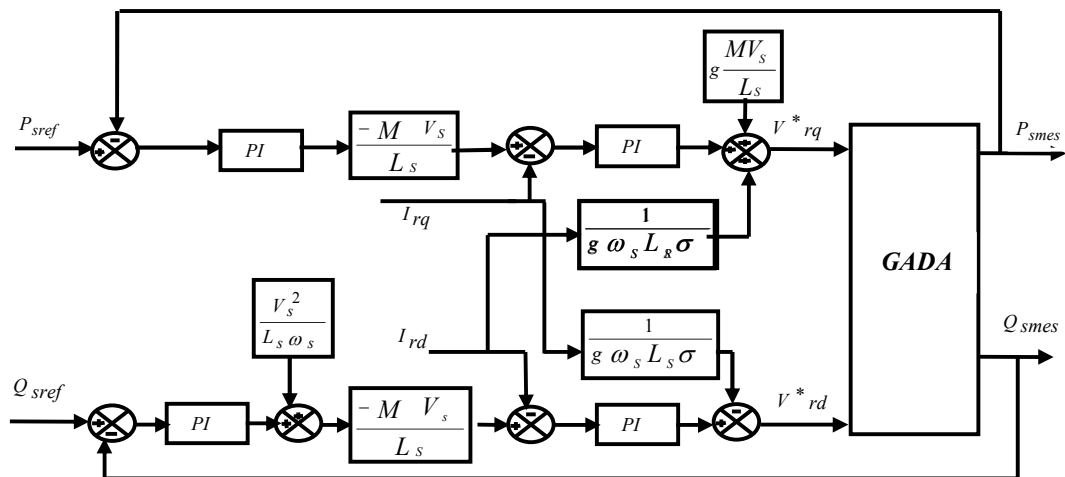


Figure 4-6 Schéma block de CV indirecte des puissances en P-BF & en I-BF

4.4.5 Résultats de la simulation des commandes vectorielles des puissances

Les simulations des commandes vectorielles directe et indirecte (P -BF & I -BF) de la GADA sont effectuées sous MATLAB/Simulink sur une machine asynchrone à rotor bobiné de 4 kW dont les paramètres sont donnés en Annexe.

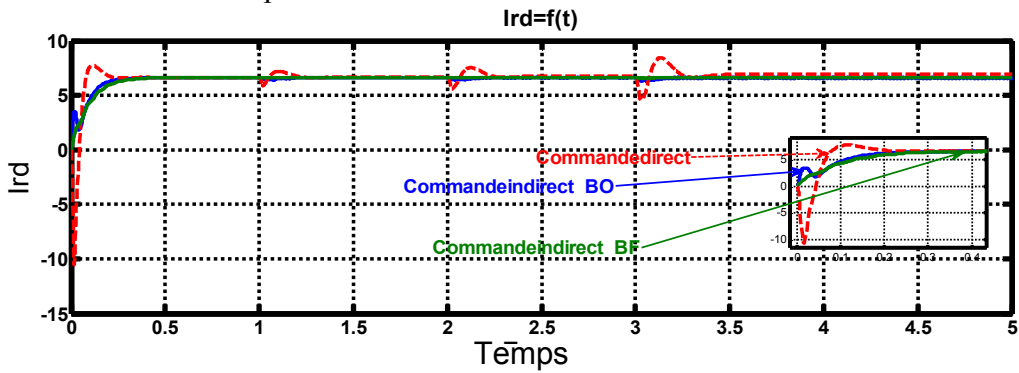
On a procédé aux essais de commande suivants tels que :

- (i) Pendant une durée de 5s la GADA est soumise à une alimentation du stator supposée à partir d'un réseau puissant imposant fréquence et tension nominales, soient 380/220 V et 50 Hz.
- (ii) Ensuite le rotor de la GADA se trouve entraînée, par un moteur d'entraînement ou par exemple par une turbine d'une éolienne, à des différentes vitesses supposées entre 160 et 170 rd /s, tout en imposant les échelons de puissances actives P_s supposées aussi disponibles pour la génératrice. Quant à la référence de puissance réactive Q_s est fixée à zéro pour avoir un facteur de puissance unitaire au stator.

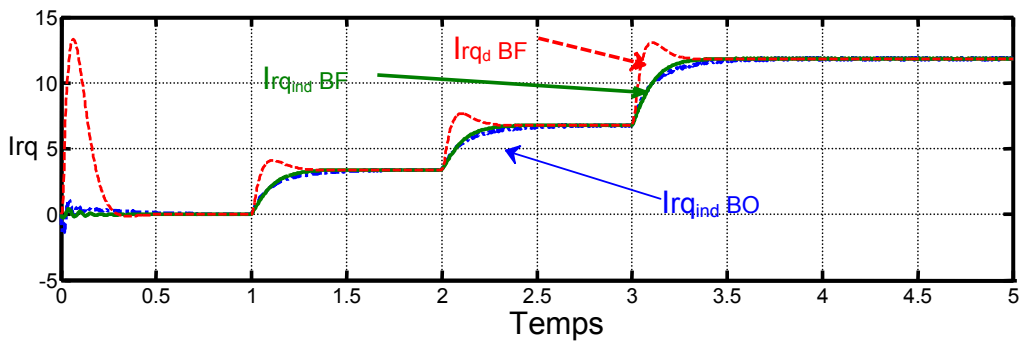
Les résultats obtenus par la méthode P -BF & I -BF , qui sont illustrés par les différentes courbes en trait continu dans la figure 4.7 sont les plus performants que la commande direct illustrés par des différentes courbes en trait pointillé. Les échelons de références de puissances imposées à la GADA sont bien suivis et sans dépassement avec faibles oscillations en régime transitoire, de plus le couplage entre les deux puissances s'avère très faible. Évidemment partant de ces résultats, on ne peut qu'a adopter la commande vectorielle indirecte à 2BFs. Cependant, au prix de la complexité de son implantation nous fait suggérer l'idée d'aller vers des commandes toujours dites directes pour la suite de nos travaux, pas spécifiquement à flux et tension orientés, et permettant d'acquérir des avantages relatifs aux performances dynamiques (surtout en temps de calcul réduit) avec simplicité de l'algorithme et notamment de l'implantation. Ainsi dire, la suite des sections concernera donc la présentation des nouvelles approches de commandes robustes proposées pour la GADA dont le stator pour la première approche alimentant un site isolé et pour la seconde connectée à un réseau puissant lui injectant plus de puissance active à facteur de puissance unitaire. Ces approches de commandes sont les suivantes :

- Commande par retour d'état complexe de la tension de stator d'une GADA pour un site isolé

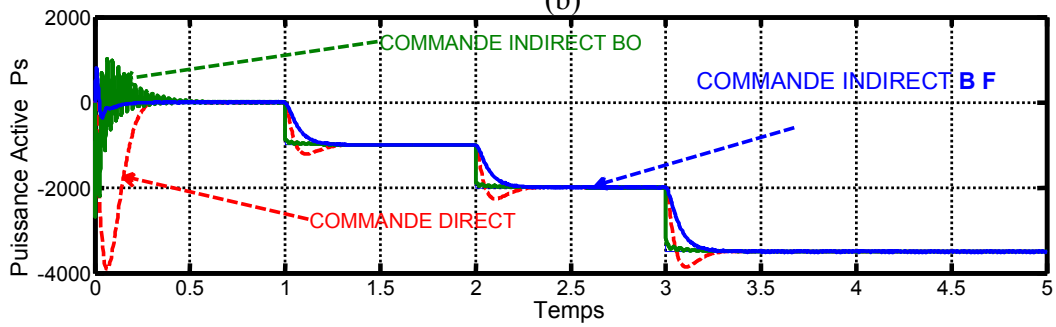
- Commande directe de puissance apparente S ou en anglais "*S-Power*"-control pour une GADA connectée sur un réseau puissant



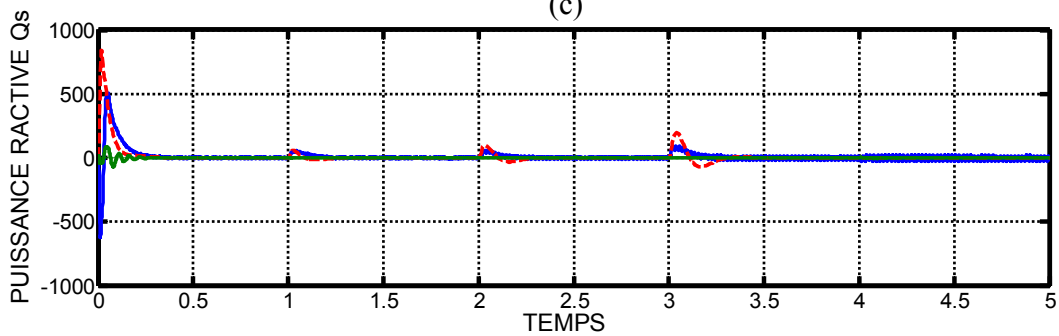
(a)



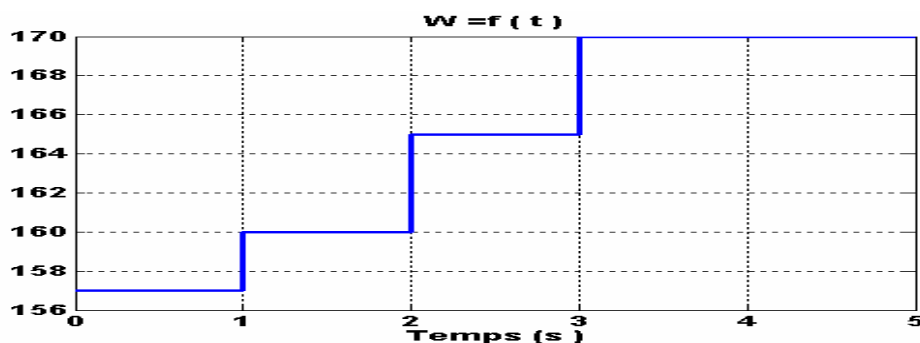
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 4-7 Résultat de simulation pour les commandes vectorielles de la GADA connectée au réseau

- Allures des courants rotorique selon l'axe d ($i_{rd}(t)$)
- Allures des courants rotorique selon q ($i_{rq}(t)$)
- Allures de la puissance active $P_s(t)$
- Allures de la puissance réactive $Q_s(t)$
- Allures de la vitesse $\Omega(t)$

4.5 Contrôle par retour " feedback " complexe de la tension du stator

Ce travail concerne le développement d'un contrôle linéaire et découplé de la tension du stator via une fonction de transfert complexe tension stator-rotor. En utilisant le modèle de forme complexe de la machine à induction, on peut obtenir un contrôle proposé à travers retour d'état linéaire " feedback" complexe donné par les gains de forme complexe. Cette commande par retour d'état complexe peut être considérée comme une commande robuste vis-à-vis des variations des paramètres du modèle de la machine [22-23]. Elle dépend beaucoup plus des fréquences du stator et du rotor où le premier est fixé à sa valeur nominale souhaitée tandis que le second peut être facilement estimé à partir de la vitesse du rotor mesurée. Les tests de simulation attestent largement la validation de ce schéma de contrôle proposé en particulier lorsqu'il est utilisé pour un site électrique isolé.

4.5.1 Tensions complexe stator – rotor

La conception de cette dite commande pour le contrôle de la tension du stator est réalisée à partir de la tension du rotor. Ainsi, on peut supposer que le courant du stator \bar{i}_s comme une perturbation car il est directement lié à l'énergie de consommation de la charge [22]. D'autre part, le courant du rotor \bar{i}_r peut être considéré comme un flux de transfert de puissance entre les armatures du rotor et

du stator. Définissons comme perturbations les chutes de tension du stator et du rotor suivantes, $\Delta\bar{v}_S$ et $\Delta\bar{v}_R$ les termes existants dans le modèle précédent (4-1) qui sont ensemble fonction du courant statorique.

$$\begin{cases} \Delta\bar{v}_S = \Delta\bar{v}_S(\bar{i}_S) = (R_S + sL_S + jL_S\omega_S)\bar{i}_S \\ \Delta\bar{v}_R = \Delta\bar{v}_R(\bar{i}_S) = M(s + j\omega_R)\bar{i}_S \end{cases} \quad 4-9$$

Ainsi, les nouvelles tensions du stator et du rotor (\bar{u}_S, \bar{u}_R) peuvent être formulées comme :

$$\begin{cases} \bar{u}_S = \bar{v}_S - \Delta\bar{v}_S(\bar{i}_S) = M(s + j\omega_S)\bar{i}_R \\ \bar{u}_R = \bar{v}_R - \Delta\bar{v}_R(\bar{i}_S) = (R_R + sL_R + jL_R\omega_R)\bar{i}_R \end{cases} \quad 4-10$$

Eliminer le courant du rotor dans les dernières équations (4-10) conduit à établir une fonction de transfert complexe suivant:

$$\bar{T}_S = \frac{\bar{u}_S}{\bar{u}_R} = \beta \frac{(s + j\omega_S)}{1 + jT_R\omega_R + sT_R} \quad 4-11$$

où, $\beta = \frac{M}{R_R}$ est le temps de 'magnétisant' du rotor constant

$T_R = \frac{L_R}{R_R}$ est la constante du rotor

En revenant vers les tensions initiales du stator et du rotor (\bar{v}_S, \bar{v}_R), on peut écrire ce qui suit en utilisant la précédente fonction de transfert complexe comme

$$\bar{v}_S = \bar{T}(s)\bar{v}_R + \bar{d}(s) \quad 4-12$$

Evidemment $\bar{d}(s)$ dénote le terme de perturbation complexe, car il est en fonction du courant du stator, donné comme suit :

$$\bar{d}(s) = -\bar{T}(s)\Delta\bar{v}_R + \Delta\bar{v}_S \quad 4-13$$

4.5.2 Loi de commande par un retour d'état complexe, "Feedback Complexe Law Control"[23]

L'existence des termes imaginaires $j\beta\omega$ et $jT_R\omega_R$ dans la fonction de transfert complexe (4-11), produit un couplage entre les tensions du stator et du rotor. Éviter ce problème, revient à réaliser un contrôle en découplé par un retour d'état complexe selon la loi de contrôle suivante :

$$\bar{v}_R = \bar{L}\bar{w} - \bar{K}\bar{v}_S \quad 4-14$$

Où \bar{L} , \bar{K} sont respectivement les gains complexes appliqués à la nouvelle tension de commande du rotor \bar{w} et à la tension du stator à contrôler \bar{v}_S . Évidemment, \bar{v}_R reste la réelle tension de commande.

En introduisant (4-14) dans (4-12) on a:

$$\bar{v}_S = \frac{\bar{T}_S(s)\bar{L}}{1 + \bar{T}_S(s)\bar{K}}\bar{w} - \frac{1}{1 + \bar{T}_S(s)\bar{K}}\bar{d}(s) \quad 4-15$$

Si la fonction de transfert complexe $\bar{T}(s)$ est réécrite comme

$$\bar{T}(s) = \beta \frac{\bar{N}(s)}{\bar{D}(s)} \quad 4-16$$

où $\bar{N}(s)$ et $\bar{D}(s)$ désignent respectivement le numérateur et le dénominateur de $\bar{T}(s)$. Filtrer le zéro complexe indésirable, $s = -j\omega_s$, revient à appliquer à la nouvelle entrée de la tension du rotor \bar{w} le gain complexe \bar{L} dans la formule (4-15) tel que l'on a

$$\bar{L} = \frac{1}{N} = \frac{1}{s + j\omega_s} \quad 4-17$$

Prise en compte des expressions (4-16) et (4-17), la formule (4-15) peut être réécrite comme

$$\bar{v}_S = \frac{\beta}{\bar{D} + \beta\bar{K}\bar{N}}\bar{w} - \frac{\bar{D}}{\bar{D} + \beta\bar{K}\bar{N}}\bar{d}(s) \quad 4-18$$

Rendre le dénominateur de la fonction de transfert de poursuite complexe dans (4-18) complètement indépendant du terme complexe non désiré $jT_R\omega_R$ conduit à définir le polynôme caractéristique comme suit

$$\bar{D} + \beta\bar{K}\bar{N} = 1 + sT_R \quad 4-19$$

Par conséquent, nous obtenons le gain du feedback complexe tel que

$$\bar{K} = \beta^{-1} \frac{-j\omega_R T_R}{s + j\omega_R} = -\left(\frac{L_R}{M}\right)\omega_R \bar{L} \quad 4-20$$

Notons que le choix des gains complexes, \bar{L} et \bar{K} concernant (4-17) et (4-20), permet entièrement le découplage du contrôle de la tension du stator de la GADA. De plus, ces gains complexes peuvent être considérés robustes contre la variation des paramètres de la machine, en particulier

dans (4-20) où l'on peut supposer que $\frac{L_R}{M} \cong C^{ste}$. Ces gains complexes dépendront seulement des fréquences du stator et du rotor (ω_S, ω_R) le premier est fixé à sa valeur nominale souhaitée et le second est obtenu à partir de la vitesse pouvant être mesurée à partir de l'encodeur incrémental lié à l'arbre du rotor.

Ainsi, la fonction de transfert de la perturbation complexe appliquée \bar{d} peut être réécrite comme

$$\frac{\bar{D}}{s + j\omega_R} \bar{d}(s) = \bar{d}_1(s) - G(s)\bar{d}(s) \quad 4-21$$

Où, $\bar{d}_1(s) = j\omega_R T_R \bar{d}(s)$

Et, $G(s) = \frac{1}{1 + sT_R}$ 4-22

Notez que $\bar{d}(s)$ et $d_1(s)$ dépendent du courant du stator (de la charge) et aussi dépendent implicitement de la vitesse du rotor à travers les fréquences du stator et du rotor. Enfin, après le contrôle découplé réalisé discuté ci-dessus, la formule (4-15), qui est maintenant caractérisée par la fonction de transfert de poursuite $G(s)$ réelle du stator-rotor fonction telle que

$$\bar{v}_s = \beta G(s)\bar{w}(s) - \bar{d}(s) + G(s)\bar{d}(s) \quad 4-23$$

Maintenant, il est facile, par exemple, de contrôler la tension du stator via un contrôleur PI tel que:

$$\bar{w}(s) = PI(s)(\bar{v}_{ref}(s) - \bar{v}_s(s)) \quad 4-24$$

$$PI(s) = (k_p + \frac{k_i}{s}) \quad 4-25$$

k_p, k_i : gains du PI

L'introduction du contrôleur PI dans la formule (4-23) donne

$$\bar{v} = \frac{G(s)PI(s)}{1 + G(s)PI(s)} \bar{v}_{sref} - \frac{1}{1 + G(s)PI(s)} \bar{d}(s) + \frac{1}{1 + G(s)PI(s)} \bar{d}_1(s) \quad 4-26$$

En utilisant la méthode de placement le pôle dont le PI est suffisamment calibré, la perturbation peut être aussi raisonnablement rejetée. En effet, nous pouvons noter dans l'état de régime statique, c'est-à-dire,

$s \rightarrow 0 \Rightarrow PI(s) \rightarrow \infty$, nous pouvons obtenir que $\bar{v}_s \equiv \bar{v}_{sref} \quad \forall \bar{d}(s)$ et $\forall \bar{d}_1(s)$.

4.5.3 Résultats de simulation

- *Présentation du système : schéma block*

La figure 4.9 présente un système constitué d'une GADA entraînée par une turbine d'éolienne. Le rotor est commandé en tension via un onduleur MLI et est entraîné mécaniquement via un multiplicateur de vitesse par la cinétique des vitesses variables du vent. Notons la présence de gains complexes pour réaliser un contrôle découplé. À contrôler la tension du stator, deux contrôleurs *PI* linéaires sont utilisés en respectant les axes *d* et *q*. Les tensions complexes du stator et du rotor sont reconstituées à partir des tensions alternatives réelles via la transformation de Park, comme le montre la figure 4.8. Les angles de rotation du stator θ_s et le rotor θ_r sont donnés par intégration à partir des fréquences angulaires du stator et du rotor, respectivement.

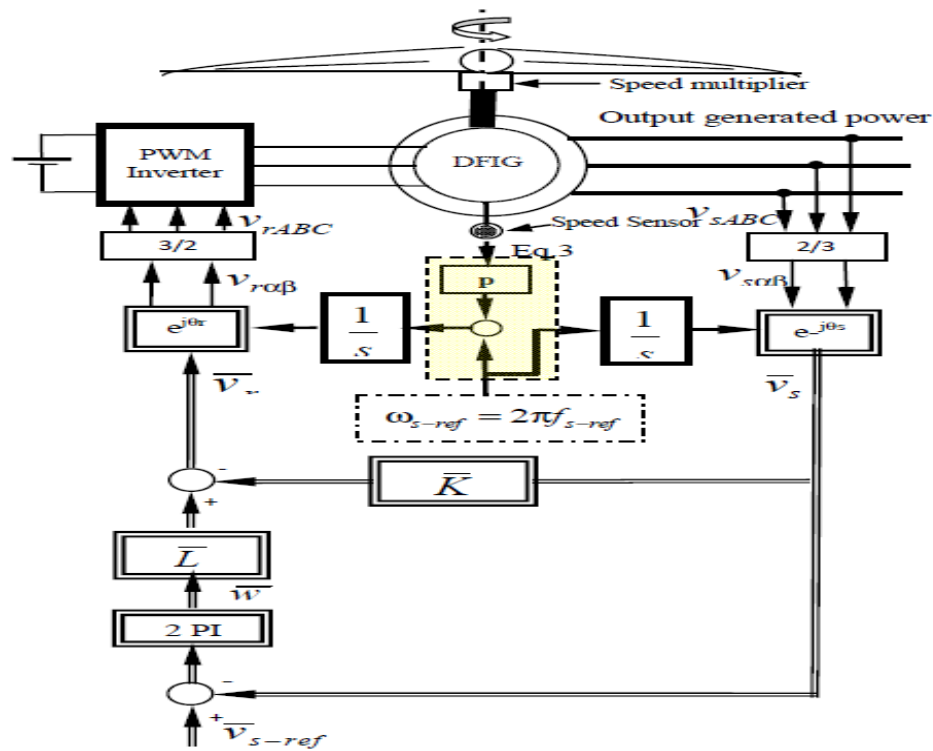


Figure 4-8 Schéma bloc du modèle de contrôle proposé de la GADA

La fréquence du stator est imposée à sa valeur nominale 50 Hz, l'angle du stator θ_s est linéairement

variable en fonction du temps. En utilisant la relation (4-11), la fréquence du rotor peut être bien donnée par la mesure de la vitesse.

- *Exploitation des références*

Pour valider ce contrôle proposé de la GADA, une simulation numérique a été effectuée sur les données de la machine données en annexe. La simulation a été réalisée en utilisant les routines complexes du progiciel "package" SIMULINK / MATLAB. La figure 4.9 représente la vitesse du rotor imposée et générée à partir d'un modèle de vitesse du vent donné. Supposons avoir une consommation de puissance active et réactive du stator illustrée par la figure 4.10. Ces puissances sont obtenues par simulation où la résistance de charge a été augmentée de deux fois à 2 s et l'inductance de charge a été amplifiée par cent fois à 6 s.

- *Résultats de la simulation et discussions*

La figure 4.11 montre le contrôle de la tension du stator présentée par ses parties réelle (composante directe) et imaginaire (composante quadratique) pendant que la machine fonctionne selon les conditions indiquées précédemment, en l'occurrence la variation de la vitesse du rotor (Fig.4.9) et les consommations de puissance active et réactive du stator (Fig.4-10).

Notons que la partie réelle de la tension du stator est bien contrôlée pour suivre sa référence constante désirée égale à $220\sqrt{2} = 310\text{V}$. Le contrôle de découplage est illustré par la partie imaginaire de la tension du stator qui varie aux voisinage de zéro Volt. La figure 4.12 montre la tension du stator contrôlée en fonction du temps. La figure 4.13 illustre un zoom de la figure 4.12 dans un intervalle de temps de 2,6 jusqu'à 3 s. On peut également voir sur cette figure 4.12 le niveau maintenu de la tension du stator à sa valeur mentionnée (310 V) et on peut évidemment calculer pour une période du signal de tension correspond à 0,02 s donnant le 50 Hz souhaité du côté du stator.

Comme le montre la figure 4.14, le courant du stator suit normalement les changements de charge électrique (consommation du stator) qui sont considérés comme des perturbations. Les figures 4.15 et 4.16 montrent respectivement la commande de la tension input du rotor et son zoom réalisé dans le même intervalle du temps de 2,6 à 3s. Évidemment, cette allure obtenue de la tension

du rotor explique la manière dont le contrôleur PI tente d'évoluer pour répondre à la commande souhaité

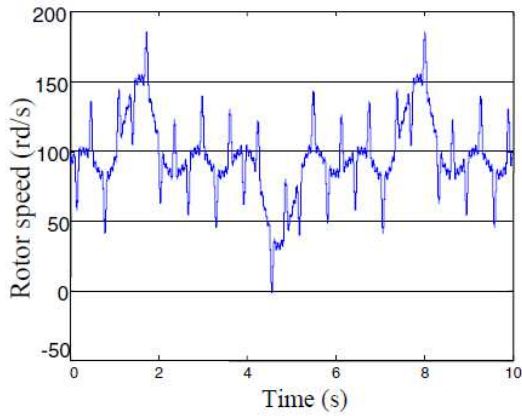


Figure.4-9 Variation du vitesse du rotor en fonction de temps

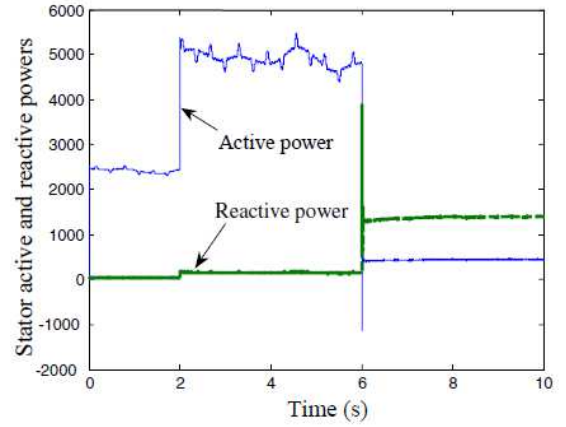


Figure.4-10 Variation du puissance Active et Réactive en fonction de temps

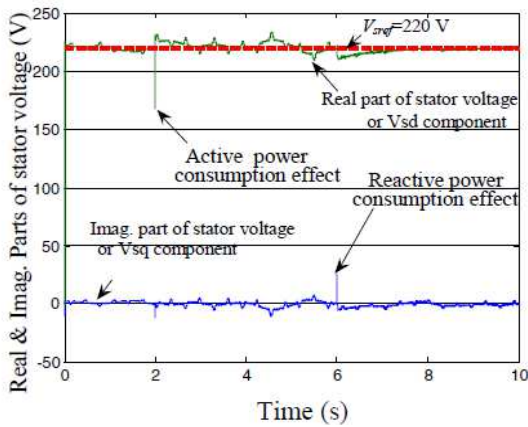


Figure 4-11 Parties réelles et imaginaires de la tension du stator en fonction du temps

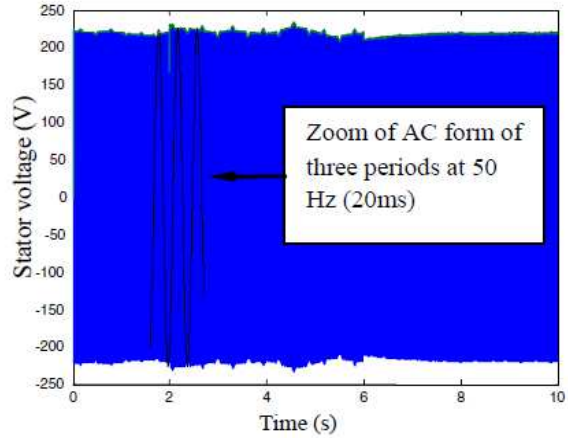


Figure 4-12 Variation du tension stator en fonction de temps

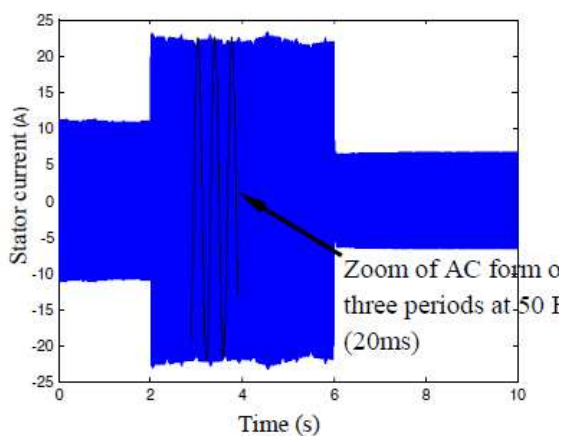


Figure.4-13 Variation du courant du stator en fonction de temps

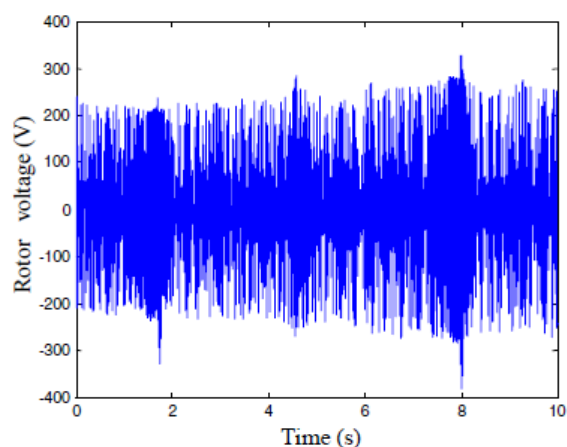


Figure 4-14 Variation de la tension du rotor en fonction de temps

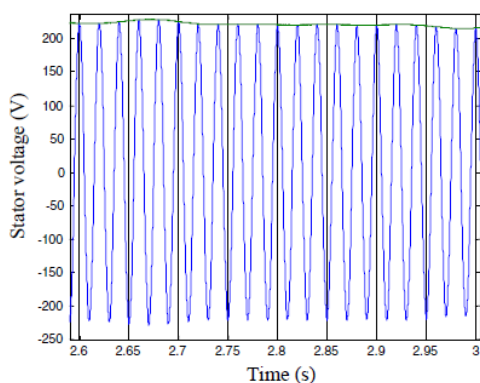


Figure 4-15 Zoom de la Figure 4-14 à 1s à 2s de la tension du stator en fonction du temps

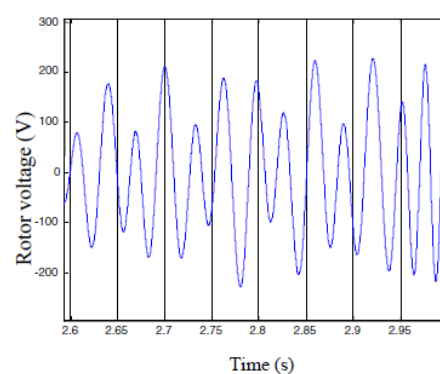


Figure 4-16. Zoom de la Figure 4-13 à 1s à 2s
La tension de commande d'entrée du rotor en fonction du temps

4.6 "S-Puissance" commande d'une GADA connectée sur un réseau

Dans le contrôle de la génération électrique, le contrôle de puissance direct (DPC) provient de DTC pour les machines à induction. Plusieurs chercheurs ont concentré leurs efforts pour faire progresser les techniques DPC qui fonctionnent à une fréquence de commutation variable [24-25]. Les filtres harmoniques et les convertisseurs de puissance sont coûteux et compliqués, qui est la conséquence de l'utilisation de la commutation à fréquence variable. Récemment, pour résoudre ce problème, le DPC à fréquence de commutation constante a été développé pour le GADA [25-26].

Dans ce travail, l'approche DPC développée a été formatée sous une forme complexe permettant de réduire suffisamment le temps de calcul du contrôle. Par la suite, le dite approche est soi-disant

un contrôle de puissance apparente directe ou contrôle de puissance directe "S-Puissance" ou "S-Power" en anglais, le terme complet en abréviation DSPC. Afin d'améliorer la précision et d'assurer une bonne performance de cette approche, celle-ci doit inclure la saturation dans la trajectoire du flux principal modélisé en ajustant l'inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant [27]. Ainsi que, les contrôleurs de puissance active et réactive et la modulation ISVM (Imaginary Space-Vector Modulation) est combinés pour remplacer les contrôleurs d'hystérésis utilisés dans les variateurs DSPC-GADA proposés dans la littérature. Avec l'utilisation de la technique ISVM, nous bénéficions de deux avantages tels que le peu de temps de calcul pour sa mise en œuvre numérique et pour sa fréquence de commutation fixe de l'onduleur. De là, il résulte une fréquence de commutation fixe du convertisseur de puissance en utilisant un algorithme simple et lisse qui diminue le contenu des harmoniques

4.6.1 Estimation du flux du rotor par la stratégie S-Power

La dite S-power, appelé puissance apparente du stator, est donnée en complexe de la façon suivante:

$$\bar{S} = \bar{u}_S \cdot \bar{i}_S^c = P_S + jQ_S \quad 4-27$$

Où, P_S et Q_S indiquent respectivement les puissances active et réactive du stator et la notation $(.)^c$ signifie le conjugué complexe. Considérons que la fréquence et la tension du stator de la GADA sont imposées par un réseau puissant. Les pertes de puissance peuvent être négligées et la dérivée flux du stator peut être supposée nulle. A partir des équations (4-1) et (4-9), nous pouvons écrire

$$\bar{S} = \bar{u}_S \cdot \bar{i}_S^c \approx j\omega_S \bar{\Phi}_S \cdot \bar{i}_S^c \quad 4-28$$

A partir des équations (4-2), le courant du stator peut être formulé par les flux du stator et du rotor comme suit:

$$\bar{i}_S = (\sigma L_S)^{-1} \bar{\Phi}_S + (\sigma - 1) \cdot (\sigma M)^{-1} \bar{\Phi}_R \quad 4-29$$

Où $\sigma = 1 - M^2 / L_S L_R$ est. Le facteur de flux de fuite

En utilisant les équations (4-28) et (4-29) et en adoptant $\bar{u}_s = |\bar{u}_s|$ donné l'orientation sur l'axe (d) tel que $u_{sd} = 0$, on peut donc écrire $|\bar{\Phi}_s| \approx |\bar{u}_s|/\omega_s$ et la puissance S du flux du rotor peut s'écrire comme

$$\bar{S} = B \cdot \bar{\Phi}_R^c + jA \quad 4-30$$

Les paramètres A et B sont des constantes, définissant la relation complexe entre la puissance S et le flux du rotor, sont donnés comme suit:

$$A = \frac{1}{\sigma L_s \omega_s} |\bar{u}_s|^2 \text{ et } B = \frac{\sigma - 1}{\sigma M} |\bar{u}_s| \quad 4-31$$

A partir des équations (4-30) et (4-31), le flux rotorique peut être directement estimé à partir de S-Power, qui est invariante par la transformation de Park. Cette S-power est déduite par des mesures de tension et de courant de la GADA dans le référentiel stationnaire par la transformation de Concordia. Une fois que le flux complexe conjugué du rotor est estimé, ils s'en suivent son module et son argument.

4.6.2 Contrôle direct de la puissance "Direct S-power"

En supposant que les pertes de puissance du rotor sont également négligées, la tension du rotor des équations (4-1) conduisant à écrire la fonction de transfert comme un simple intégrateur comme suit :

$$\frac{\bar{\Phi}_R}{\bar{U}_R} = \frac{1}{s} \quad 4-32$$

où $s = \frac{d}{dt}$ est un opérateur dérivé et $\bar{U}_R = \bar{u}_R - j\omega_r \bar{\Phi}_R$ est la nouvelle tension appliquée qui est obtenue quand le terme $j\omega_r \bar{\Phi}_R$ est compensé extérieurement à partir de la mesure de la puissance \bar{S} donnée par l'équation (4-30). D'autre part, cette dernière équation permet également d'établir que la puissance \bar{S} varie proportionnellement au flux conjugué du rotor caractérisé par le gain proportionnel B donné en (4-31). De cette manière, en se référant aux équations (4-30) et (4-32), la puissance \bar{S} peut être contrôlée par la nouvelle tension du rotor d'entrée \bar{U}_R . Formulé sous forme complexe, le contrôle peut être écrit rigoureusement par les équations suivantes:

$$\frac{\bar{\Phi}_R}{\bar{U}_R} = \frac{1}{s} \Rightarrow \frac{\bar{S}}{\bar{\Phi}_R} \cdot \frac{\bar{\Phi}_R}{\bar{U}_R} = \frac{B}{s} \Rightarrow \frac{\bar{S}}{\bar{U}_R} = \frac{B}{s} \quad 4.33$$

$$\bar{U}_r = PI \cdot (\bar{S}_{ref} - \bar{S}) \quad 4.34$$

Où un PI exprimé par $PI = k_p + \frac{k_i}{s}$ avec k_p et k_i définissent respectivement ses gains proportionnel et intégral. Ensuite, la tension de rotor réelle d'input contrôlant la GADA par la loi d'approche de commande de puissance apparente \bar{S} directe est alors donnée comme suit:

$$\bar{u}_R = PI \cdot (\bar{S}_{ref} - \bar{S}) + j\omega_R \bar{\Phi}_R \quad 4.35$$

Le contrôle S-Power en boucle fermée est alors formulé comme fonction de transfert du second ordre donné ci-dessous, le choix du facteur d'amortissement ξ et de la fréquence propre ω_n déterminent de manière adéquate les paramètres des gains du PI .

$$\frac{\bar{S}^c}{\bar{S}_{ref}} = \frac{1 + 2\xi \frac{\omega_n}{s}}{1 + 2\xi \frac{\omega_n}{s} + \frac{\omega_n^2}{s^2}} \quad 4.36$$

$$\frac{1}{Bk_i} = \omega_n^2 \quad 4.37$$

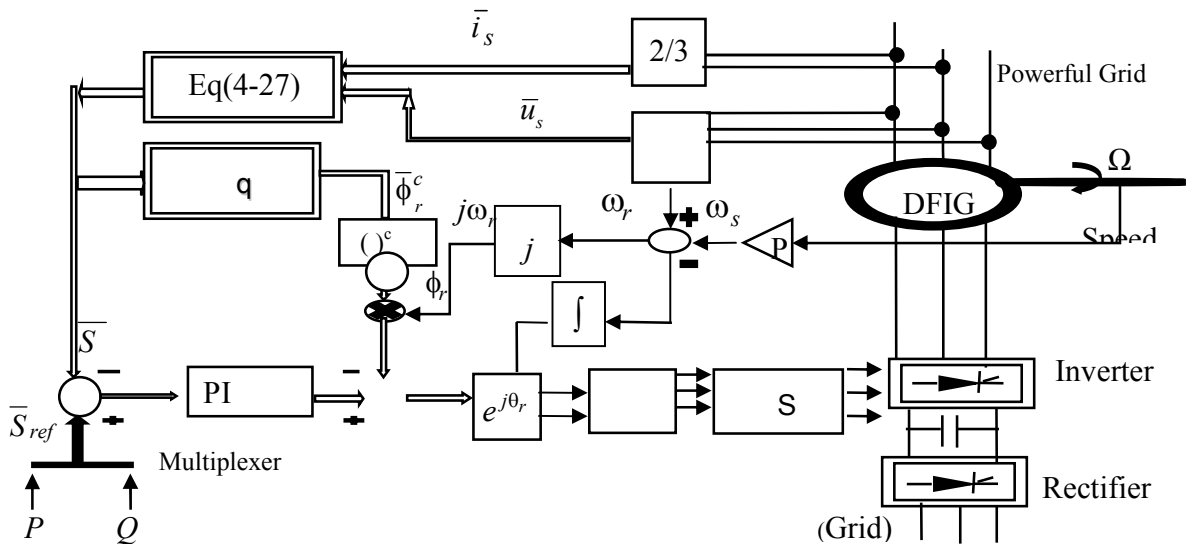


Figure 4-17 Schéma block du DSPC pour une GADA connectée au réseau

4.6.3 Résultats de Simulation et Discussion

Les données de la machine sont données en annexe. Afin de valider notre approche, des tests de simulation ont été réalisés en utilisant le schéma de contrôle proposé comme illustré sur la figure 4.17.

Les conditions d'essai, avec un temps de simulation d'horizon de 3 secondes, sont définies de telle sorte que la vitesse variable imposée sur l'arbre rotor passe de 157 rd / s à 160 rd / s tandis que la puissance réactive est fixée à 0VAR. Pendant les simulations, la période d'échantillonnage a été fixée à 200µs. La fréquence de commutation de la technique ISVM imaginaire a été effectuée à 5 kHz.

Les résultats de la simulation du SPDC proposé pour une GADA sont montrés dans les figures 4-18. La vitesse du rotor imposée et la référence de puissance active sont mentionnées par les notations " Ω_{ref} " et " P_{ref} ".

Pour $0 \leq t \leq 0.7$ s, $\Omega_{ref} = 157$ rd/s et $P_{ref} = 0$ W

Pour $0.7 \leq t \leq 1.2$ s, $\Omega_{ref} = 158.5$ rd/s et $P_{ref} = -2000$ W

Pour $1.2 \leq t \leq 2.5$ s, $\Omega_{ref} = 160$ rd/s et $P_{ref} = -4000$ W

La stratégie de contrôle proposée révèle une réponse dynamique rapide et les puissances active et réactive suivent leurs valeurs de référence souhaitées en quelques millisecondes sans aucun effet enregistré.

La stratégie de contrôle proposée révèle une réponse dynamique rapide et les puissances actives et réactive qui suivent leurs valeurs de référence souhaitées en quelques millisecondes sans aucun effet enregistré en raison des variations de la vitesse et des paramètres. Notons que les harmoniques de courant de stator sont suffisamment réduites par ce schéma DSPC proposé comme le montre la figure 4-18 où le THD = 1,8% qui peut être considéré comme très important pour un réseau propre et non pollué.

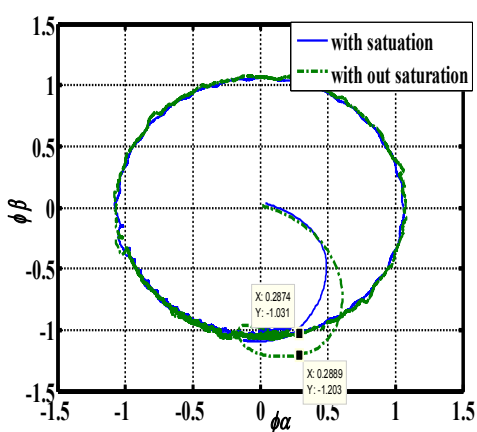
Pour renforcer la stratégie de contrôle proposée du modèle du générateur, les simulations ont été faites en incluant un modèle de générateur avec et sans effet de saturation. Les deux simulations sont montrées dans la figure 4a

Le flux du rotor du modèle saturé est nettement plus rapide que le modèle insaturé dans l'état transitoire. Ainsi, l'effet de saturation peut être incorporé de manière plus importante pour améliorer les performances transitoires du SPDC de la GADA sans perturber le régime permanent

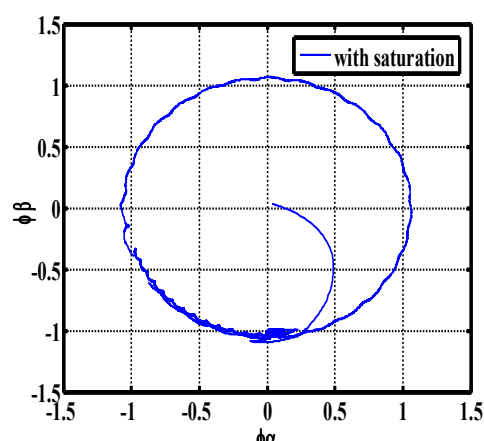
De plus, l'effet de la variation du temps d'échantillonnage est indiqué par la figure 4-18 d. Ce dernier illustre graphiquement la réponse du modèle de générateur à la fois pour 5 kHz et 10 kHz lorsqu'un changement d'étape est donné à la puissance active. Nous remarquons une meilleure performance de la machine à 5 kHz, en revanche, il y a une moindre performance à 10 kHz

Pour vérifier que les variations des paramètres de la GADA ne causent pas d'effet significatif sur les performances de la stratégie de contrôle, une simulation avec une variation de 50% de toutes les inductances a été effectuée.

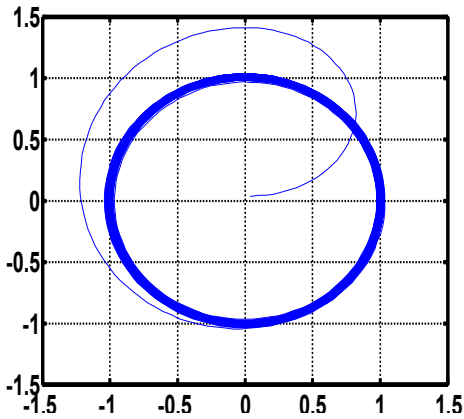
Les résultats sont illustrés sur la figure 4.19, même avec des erreurs d'inductance aussi importantes, la réponse du système est suffisamment bonne et le système maintient ses hautes performances dans les régimes permanent et transitoire. Les résultats obtenus démontrent que le contrôle DSPC de la GADA proposé, qui fonctionne à vitesse variable, peut être bien utilisé comme une solution intéressante dans le domaine de l'énergie renouvelable de l'éolien et qu'elle peut être mise en œuvre avec moins de temps de calcul.



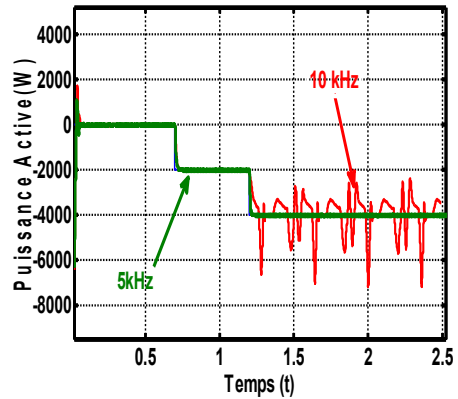
a- Trajectoire du flux du rotor



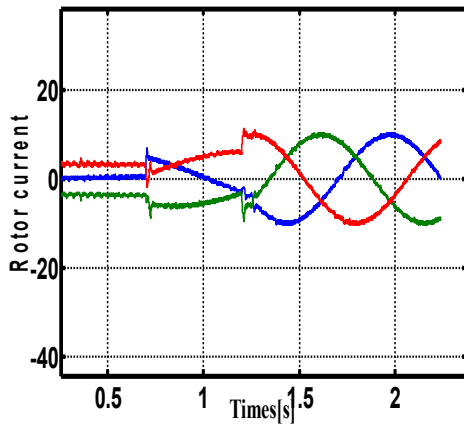
b- Trajectoire du flux du rotor



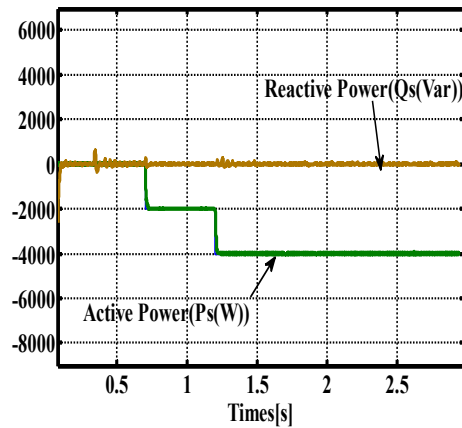
c- Trajectoire du flux du stator $\phi_{s\beta} = f(\phi_{s\alpha})$



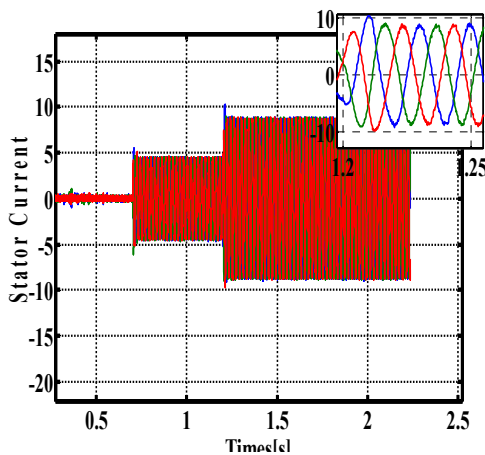
d-Allures de la puissance active pour fréquence porteuse 5kHz et 10kHz



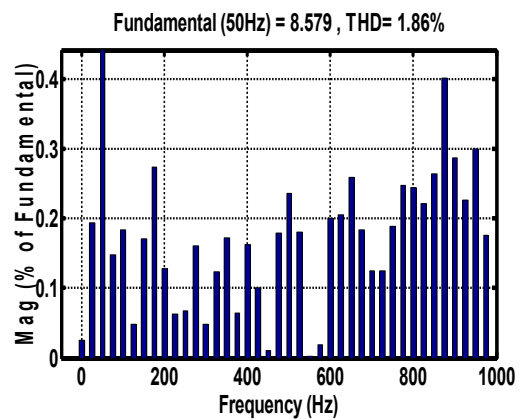
j-Allure du courant du rotor pour les trois phases



h-Allures de la puissance active et la puissance réactive

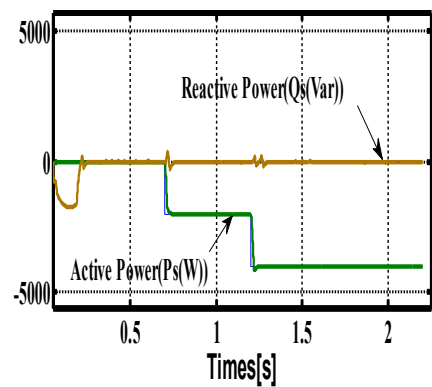
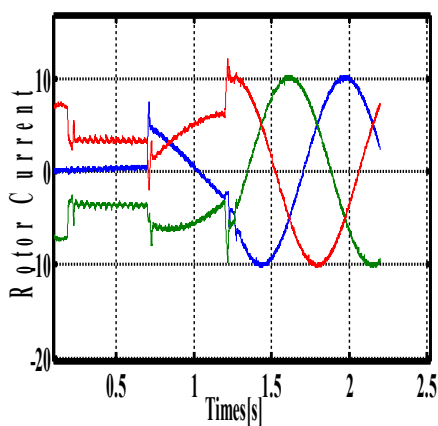
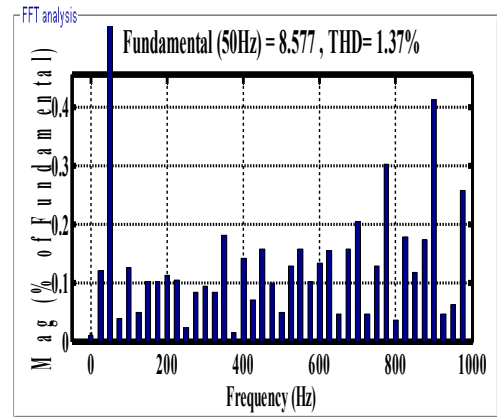
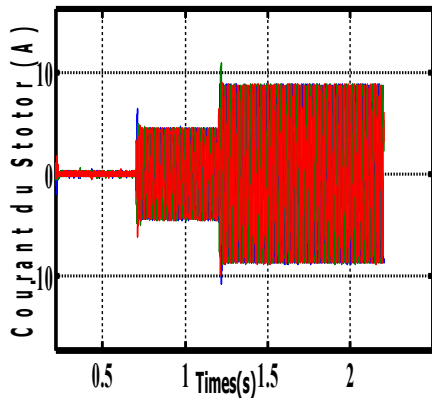
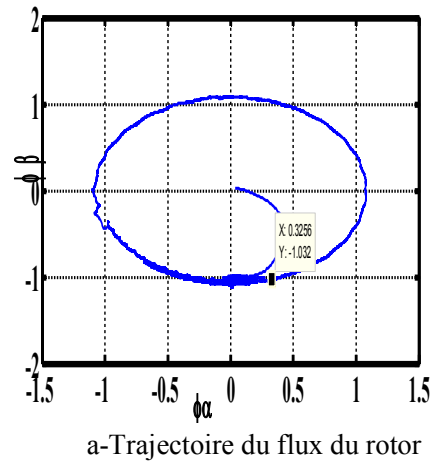
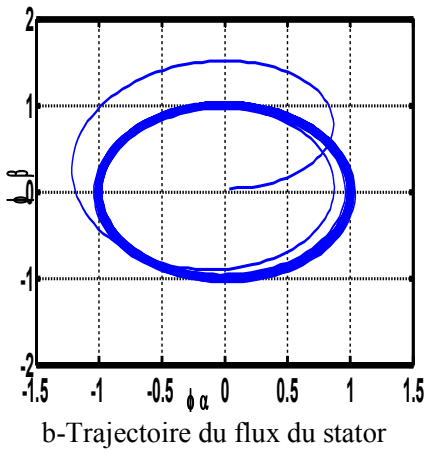


e- Allure du courant du stator pour les trois phases



f- Les spectres d'harmoniques du courant du stator d'une phase A

Figures 4.18. Les contrôles de puissance directe proposés



Figures 4.19. Les contrôles de puissance directe proposés selon des variations paramétriques ; de 50% des inductances de la GADA

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé deux parties de la commande de la génératrice asynchrone, pour d'éventuelles utilisations sur site isolé ou sur réseau puissant.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la commande de la dite machine en deux versions scalaire et vectorielle; dans la première version nous avons appliqué un simple contrôle scalaire de la tension du stator de la GAS afin de maintenir un niveau de magnétisation constante dans la machine et de rejeter les perturbations causées par une charge autonome variable. La 2^{ème} version concerne la commande vectorielle de la GADA pour pouvoir contrôler les transferts des puissances, avec l'éventualité de fonctionner à facteur de puissance unitaire, dont le stator est connecté au réseau puissant.

La deuxième partie de ce chapitre, expose deux nouvelles stratégies de commandes robustes d'une GADA. La première commande est celle donnée par retour d'état complexe pour une GADA alimentant un site insulaire. La seconde commande appelée la commande "S-Puissance", contrôlant directement et rapidement la puissance apparente au niveau du stator de la GADA connectée sur un réseau puissant. Ces deux techniques de commandes sous leur formulation complexe recommandent une implantation résolument réduite, « moins de modélisation », avec une robustesse accrue contre les variations paramétriques du modèle de la machine par rapport aux commandes vectorielles.

4.8 Références Bibliographiques

- [1] F. Blaschke, «The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvector Closed-Loop Control System for Rotating-Field Machines, » *Siemens Review*, Vol. 34, pp.217 - 220, 1972.
- [2] M. Depenbrock, «Direct Self Control DSC of Inverter-Fed Induction Machine, » *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 3, No. 4, pp. 420-429, October 1988.
- [3] M. Pinard, « Commande Electroniques des Moteurs Electriques, » *Editions Dunod*, Paris, 2004.
- [4] J. Chatelain, « Machine Electrique, » *Tome1 Editions Dunod, Presse Polytechnique Romandes*, 1983
- [5] I. Takahashi and Y. Ohmori, «High-Performance Direct Torque Control of an Induction Motor, » *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 25, No. 2, pp. 257 - 264, March – April 1989.

- [6] F. Zidani, M. S. Nait-Said, R. Abdessemed, and M.E.H. Benbouzid, « A Fuzzy Method for Rotor Time Constant Estimation for High- Performance Induction Motor Vector Control, » *Electric Power Components and Systems Journal*, USA, Vol. 31, N°6, 2003.
- [7] Y.Miloud and A.Draou, «Fuzzy Logic based Rotor Resistance Estimator of an Indirect Vector Controlled Induction Motor Drives, » *IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference*, Vol. 2, pp. 961 - 966, 2002
- [8] R. Datta, V. T. Ranganathan, “A simple position sensorless algorithm for rotor side field oriented controle of wound rotor induction machine.”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol 48, N° 4, August 2001.
- [9] R. Cárenas, R. Pena, J. Proboste, G. Asher, J. Clare, “Sensorless control of a doubly fed induction generator for stand alone operation.”, 35th Annual IEEE power Electronics Specialists Conference (PESC) 2004, Aachen, Germany.
- [10] D. Lecoq, Ph. Lataire, W. Wijmersh, “The doubly fed induction motor both stator and rotor volatge controlled by cyclo converters”, *EPE journal*, Vol 1, Oct. 2/1991, pp. 103-112.
- [11] S.Drid, "Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à InductionDouble Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation", thèse de doctorat, Batna, 2005.
- [12] Y. S. Lai and J. H. Chen, “A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant inverter switching frequency and torque ripple reduction,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, no. 3, pp. 220– 227, Sep. 2001.
- [13] N. R. N. Idris and A. H. M. Yatim, “Direct torque control of induction machines with constant switching frequency and reduced torque ripple,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 4, pp. 758–767, Aug. 2004.
- [14] J. Kang and S. Sul, “New direct torque control of induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 5, pp. 1076–1082, Sep./Oct. 1999.
- [15] G. V. Jayaramaiah and B. G. Femandes, “Analysis of Voltage Regulator for a 3 - ϕ Self-Excited Induction Generator Using Current Controlled Voltage Source Inverter”,
- [16] T. Ahmed and O. Noro, “Minimum Excitation Capacitance Requirements for Wind Turbine Coupled Stand- Alone Self-Excited Induction Generator with Voltage Regulation Based on SVC, IEICEAEEE INTELEC'OS, Oct. 19-23,2003

- [17] N. Mekkaoui," contribution à la modélisation et à la commande d'une mini-centrale éolienne à base de machines à induction simple et double alimentée",thèse de magister, Batna, 2008.
- [18] N. Mekkaoui, S. Drid and M.S. Nait-Said, "Modélisation et Commande Scalaire d'une Génératrice Asynchrone Auto-excitée", Proceedings of the 3rd International conference of Electrical Engineering ICEE'09, 19-21 mai 2009, Alger.
- [19] N. Mekkaoui, S. Drid and MS. Nait-Said,"Modeling and Control of Indirect powers of a Doubly Fed Induction Generator Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research., ISSN: 2107-6502, Volume 2, Issue 1, June 2011, 47-51
- [20] Babak N. Mobarakeh, " Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification "en Ligne" des Paramètre", Thèse de Doctorat, Polytechnique de Lorraine 2001, France
- [21] W. Leonhard, "Control Electrical Drive" Springer Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1997,Heier S.: "Grid integration of Wind Energy Conversion Systems. Second edition," John Wiley & Sons, Ltd, 2006, pp. 31-44.
- [22] L. Xu and P. Cartwright, Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 3, pp. 750–758, Sep. 2006
- [23] M. S. Nait-Said, et all, "Voltage Complex Feedback Control for Wind Powered Double Fed Induction Generator ", First international conference on renewable energies and vehicular technology, pp 293-298 2012.
- [24] R. Datta, V. T. Ranganathan, Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors
- [25] W.-S. Kim, S.-T. Jou, K.-B. Lee, Direct Power Control of a Doubly Fed Induction Generator with a Fixed Switching Frequency, Journal of Power Electronics, Vol. 9, No. 5, pp. 781 – 791, September 2009.
- [26] A. J. S. Filho de Oliveira Filho, E. R. FilhoA, Predictive Control Strategy for Doubly –Fed Induction Generator Direct Power Control, IEEE/IAS International Conference on Industry Application ,INDUSCON 2010.
- [27] N. Mekkaoui, M.S Naït-Saïd, "Direct S-Power Control for A Doubly Fed Induction Generator", Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg.Vol. 62, 4, pp. 365–370, Bucarest, 2017

Chapitre 5

STOCKAGE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE : APERÇU ET PROBLÉMATIQUES

5.1 Introduction

La libéralisation du marché de l'électricité et le développement de la production décentralisée induit de nombreux problèmes scientifiques et techniques. Ces problèmes sont liés évidemment aux nouveaux types de sources, distribuées géographiquement et se développant rapidement, mais ils concerneront également la gestion, voire la structure des réseaux d'énergie. Le problème majeur associé aux sources d'énergie décentralisées est que celles-ci ne participent pas aujourd'hui au service-système tel que le réglage de la tension, de la fréquence, les possibilités de fonctionnement en îlotage etc. Ceci est particulièrement vrai pour les énergies renouvelables dont la source primaire est difficilement prévisible et très fluctuante. Actuellement, ces types de sources se comportent comme des générateurs passifs du point de vue électrique. Le réglage de la tension et de la fréquence est dès lors reporté sur les alternateurs classiques [1-3]. Le taux de pénétration de la production

décentralisée doit alors être limité pour pouvoir garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables.

Les systèmes de stockage d'énergies (SSE) peuvent apparaître comme des solutions pertinentes pour répondre à des appoints d'énergie demandés au réseau. Cependant, les énergies électriques transformées des renouvelables et directement injectées au réseau risquent de mener ce dernier à l'instabilité due à l'intermittence des EnRI (énergies renouvelables intermittentes) et aux ruptures d'équilibre entre production et consommation d'énergie.

Les évolutions technologiques en matière des SSE entraînant une baisse des coûts et une réduction des contraintes fortes qui pèsent sur les gestionnaires du réseau en permettant d'entrevoir un réel intérêt technico-économique pour coupler la production d'électricité au stockage. Ce qui agrée l'utilisation au mieux des ressources renouvelables en évitant un délestage en cas de surproduction. Associé à une production locale d'origine renouvelable, un stockage décentralisé présenterait également l'avantage d'améliorer la robustesse du réseau électrique en permettant un fonctionnement en îlotage de la zone alimentée par cette ressource.

Dans ce chapitre, deux parties d'investigations sont à pourvoir. La première partie sera consacrée aux différentes technologies de stockage de l'électricité à la fois le stockage à long terme et à court terme, en se focalisant sur ses utilisations dans les réseaux et dans les systèmes de production à énergie renouvelable. La deuxième partie, présentera une étude bibliographique sur l'utilisation et l'application de la technologie du stockage à court terme à base d'un stockage inertiel pour pouvoir assurer l'équilibre consommation–production capable de régler l'amplitude et la fréquence des tensions qu'il en fournit.

5.2 Les différentes technologies de stockage de l'électricité.

Les systèmes de stockage d'électricité peuvent se décomposer en deux grandes familles : les systèmes de stockage à long terme et à court terme. L'électricité ne se stocke cependant pas facilement, et nécessite sa transformation sous une autre forme énergétique comme chimique,

mécanique ou thermique. Le stockage de l'énergie électrique constitue une des composantes d'un futur développement durable.

5.2.1 Stockage long terme

Les systèmes de stockage ayant un horizon temporel d'une dizaine de minute à plusieurs années peuvent être considérés comme des stockages à long terme. Ainsi, les types de stockage peuvent aller des barrages hydrauliques jusqu'aux batteries chimiques. Les systèmes de stockage électrochimique (batteries) marquent la frontière entre le court et le long terme. En effet, selon la technologie et la taille des éléments de stockage électrochimique, ils peuvent être considérés comme à long ou à court terme.

(i) Stockage par système hydraulique (STEP)

Ce système STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage) est lié à l'énergie hydraulique et donc aux barrages. À la différence d'un barrage classique, il est basé sur l'exploitation de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes. Lorsque la production électrique est abondante et peu coûteuse et qu'elle est excédentaire au regard des besoins du réseau, elle sera utilisée pour pomper l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur. Ce dernier devient ainsi le lieu de stockage d'une énergie qui pourrait être réutilisée quand le besoin s'en ferait sentir. Ces réserves d'énergie seront essentiellement utilisées pour lisser les pointes de consommation. La figure 5.1 présente le principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique pour le stockage (à long terme) des masses d'eau par pompage nécessitant un espace important, et qui peut être envisageable que dans des régions montagneuses. Un turbinage s'ensuit en cas de besoin pour produire l'électricité demandée.

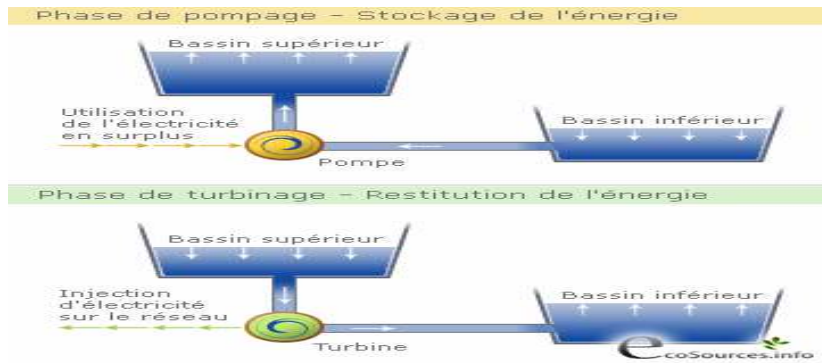


Figure 5-1 Principe de fonctionnement des phases de pompage pour stocker l'énergie et de turbinage pour produire de l'électricité

(ii) Stockage sous forme d'air comprimé (CAES, Compressed Air Energy Storage)

Le principe du CAES repose sur l'élasticité de l'air. Grâce à l'électricité considérée comme excédentaire un système de compresseurs à très haute pression (100 à 300 bars) comprime l'air présent dans une cavité naturelle ou artificielle. La récupération de cette énergie potentielle (déstockage) s'effectue par détente de l'air dans une turbine à gaz qui entraîne un alternateur et produit donc de l'électricité. La figure 5.2 présente le principe de fonctionnement d'un stockage à air comprimé.

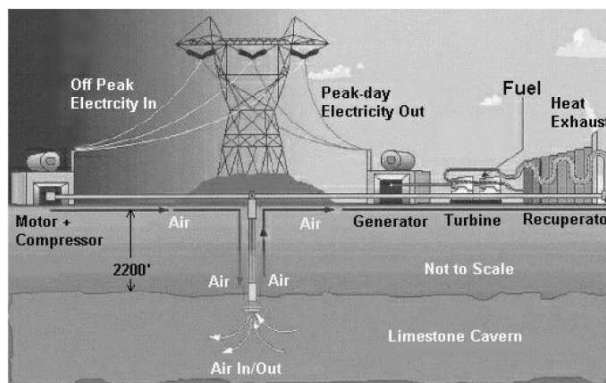


Figure 5.2 Principe de fonctionnement d'un CAES [3]

Les inconvénients de cette technologie sont le rendement, la faible manœuvrabilité (mise en route environ 15 min), l'investissement élevé et la consommation de gaz.

(iii) Stockage dans les batteries électrochimiques :

Les batteries sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Celle-ci est restituée sous forme d'énergie électrique générée par des réactions électrochimiques. Ces réactions sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte [4].

Dans certains cas, le pack batterie est associé a un système de gestion et de surveillance de charge (*Battery Management System*) qui déclenche une alarme dès la détection de phénomènes indésirables tels que l'emballement thermique et la surcharge d'une cellule. Ce système peut, aussi dans certains cas, assurer l'équilibrage entre les cellules pour un comportement uniforme du pack [5-7].

Les systèmes de surveillance et de gestion sont indispensables lors de l'utilisation de batterie au lithium car cette technologie peut subir un emballement thermique en cas de surcharge ou de déséquilibre trop important entre les cellules. Quatre types de technologie des batteries, les plus utilisés actuellement, sont consignées dans le tableau 4.1 dont il y figure les principaux avantages et inconvénients de chaque technologie.

Technologie	Avantages	Inconvénients
Plomb/Acide	Economique Recharge facile Stockage à long durée (auto-décharge faible)	Sensible aux décharges trop profondes Capacité massique faible Risque de sulfatation irréversible Durée de vie faible Pollution par plomb en cas de destruction
Li-Ion	Pas d'effet mémoire Faible autodécharge (1%/mois, qlq%/ an) Ne nécessite pas de maintenance Possède une haute densité d'énergie pour un poids faible Accepté une charge rapide	Coût élevé de production Problème de densité Sensible aux chocs Recharge sous haute surveillance risque d'explosion Recyclage très chimique

Ni -Cd (Nickel- Cadmium)	Charge simple et rapide même après une longue période de stockage Recharge facile même à basse température Grande durée de vie Bonnes performances à basse température Résistance interne très faible et faible coût	Faible densité énergétique Autodécharge assez rapide (20% par mois) Sensibilité à l'effet mémoire Assez polluant à cause du cadmium
Ni-MH Nickel /Métallique	Contient beaucoup plus d'énergie que le Nickel-Cadmium Simple à stocker et à transporter Ne pollue pas comme Ni-C	Ne supporte pas le dépassement de charge Détection de fin de charge difficile Durée de vie plus faible que le Ni-Cd en nombre de cycles Coût élevé, Tension faible

Tableau 5-1 Comparaison entre les différentes technologies de batteries [8] [9]

(iv) Stockage par Les supercondensateurs

Les supercondensateurs présentent des propriétés intéressantes pour les applications de forte puissance à de courte durée en ayant des durées de vie élevée par rapport aux accumulateurs. Le domaine d'application des supercondensateurs est vaste (transport, industrie, véhicule électrique,...) dont les avantages et inconvénients par rapport aux batteries sont énumérés ci-après comme suit [9] :

-Les avantages

- Durées de vie importante comparée aux batteries chimiques (100 000 cycles)
- Densité de puissance massique élevée (2000-4000W/kg)
- Capacité élevée (de quelques F à 5000F)
- Capacité peu influencée en fonction de la température
- Charge/décharge très rapide

-Les inconvénients

- Basse énergie (de l'ordre de 10 Wh/kg) ;
- Plage de tension limitée (2.5 à 2.7 V) ;
- Technologie moins mûre que celle des batteries (inflammable et explosif) ;
- Comportement non linéaire du composant

Les batteries ont en général une densité énergétique élevée et une faible densité de puissance. Par contre, les super condensateurs ont une haute densité de puissance et une faible densité énergétique. En d'autres termes les super condensateurs ne peuvent pas stocker autant d'énergie que les batteries, mais la dynamique avec laquelle le transfert d'énergie se fait du super condensateur vers le circuit auquel il est connecté, est beaucoup plus élevée que pour les batteries. Par conséquent, les temps de charge et de décharge dans le cas d'un super condensateur sont toujours plus faibles que dans le cas des batteries [10].

(v) Stockage par la pile à combustible (PAC)

La pile à combustible produit de l'électricité et de l'eau, accompagnée par un dégagement de chaleur. Pour le bon fonctionnement de la pile, des accessoires lui sont associés. Ils ont pour objectif d'alimenter cette dernière en hydrogène et en air, d'évacuer l'eau formée à partir de la réaction de l'hydrogène avec l'oxygène, et d'assurer le refroidissement [11-12]. À cela s'ajoute un système de supervision permettant de coordonner l'ensemble des accessoires, voir figures 5.3.

Au-delà, il restera l'obstacle endogène essentiel, le coût des technologies des PAC actuelles. Les membranes (par exemple la pile Nafion de DuPont de Nemours) incorporent des composants fluorés relativement onéreux. Il en est de même du platine, sur les électrodes. En définitive, des progrès très importants dans la maîtrise des coûts des matériaux des cœurs de piles sont indispensables pour que les PAC puissent constituer enfin une solution compétitive pour produire de l'électricité courante

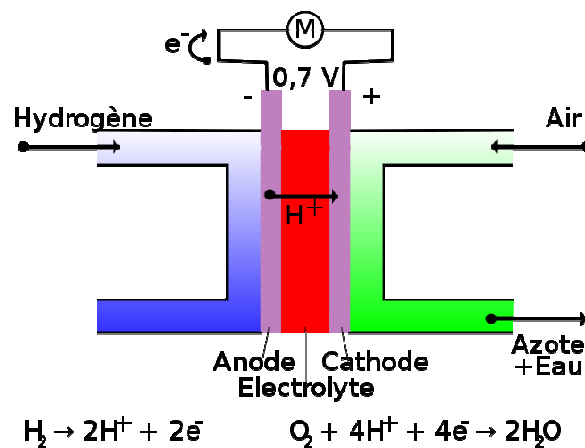


Figure 5-3 Pile à combustible [11]

(vi) Stockage sous forme thermique

Le stockage sous forme thermique consiste à chauffer de l'air ou un fluide à haute température qui peut être ensuite stocké dans une enceinte thermiquement isolée (à faible échelle, les ballons d'eau chaude peuvent être considérés comme des moyens de stockage).

Energie intermédiaire	Système de stockage	Rendement	Densité de Stockage kW/m ³	Type de cycle ou délai de décharge
gravitaire	Pompage hydraulique	0.73	2 (pour 1000m de chute)	quotidien, hebdomadaire ou saisonnier
thermique	Stockage de chaleur latente ou sensible	0.65 à 0.85	20 à 150	quotidien
de pression	Compresseur d'air	0.7	2 à 5	quotidien ou hebdomadaire
chimique	Batteries d'accumulateur électrochimique	0.7 à 0.9	5 à 150	quelques jours à quelques dizaines de minutes
chimique	Stockage H ₂ par électrolyse et pile à combustible	< 0.55	< 100	quotidien à saisonnier

Tableau 5-2 Synthèses des systèmes de stockage à grande échelle [13]

5.2.2 Synthèse sur le stockage à long terme

Plusieurs technologies de stockage à long terme sont déjà exploitées à l'étranger, l'objectif de ces systèmes est de faciliter la gestion du réseau mais aussi de favoriser la pénétration des ENR. L'utilisation de certaines technologies sont liées à des sites particuliers et ne peuvent pas être appliquées partout. Le Tableau 5.2 reprend les principales caractéristiques des systèmes de stockage à long terme [1-2].

Le frein majeur à un recours massif des systèmes de stockage est lié aux investissements importants nécessaires pour son implantation. Les investissements nécessaires dépendent:

- de la quantité d'énergie stockable,
- de la puissance installée souhaitée,
- des caractéristiques du projet, de la nature du site

Le Tableau 5.3 reprend une estimation des valeurs d'investissement en fonction de la technologie.

	Hydraulique	Air Comprimé	Batteries	Batteries à circulation	Thermique
Investissement par unité d'énergie (\$/kWh)	60-150	30-60	200-500	800-2000	40-60
Investissement par unité d'énergie (\$/kWh)	600-1500	450-1100	300-700	1500-3000	150-1000

Le Tableau 5-3. Estimation des valeurs d'investissement en fonction de la technologie.

5.3 Stockage d'énergie à court terme

Les systèmes de stockage à dynamiques rapides (sources de puissance) peuvent fournir une forte densité de puissance avec une dynamique rapide. Ces systèmes ne peuvent pas stocker une grande énergie à long terme, mais peuvent fournir de fortes puissances qui peuvent répondre à des variations rapides. Parmi ces systèmes, on peut citer les volants inertiels, les super-condensateurs, supraconducteurs et le stockage magnétique d'énergie [14-15]

5.3.1 Le stockage inertiel

Un volant d'inertie constitue un système de stockage d'énergie sous sa forme cinétique de rotation. Il est constitué d'une masse, la plupart du temps un cylindre creux ou plein (d'autres formes sont possibles). Cette masse est mise en rotation autour d'un axe, fixe en général, et enfermée dans une enceinte de protection. Ce volant d'inertie est reliée à un moteur/générateur électrique permettant la conversion l'énergie cinétique en électricité et inversement.

Cette machine électrique est elle-même connectée à un convertisseur statique réversible (redresseur en décharge, onduleur en charge) pour l'échange d'énergie entre le réseau de distribution et le système de stockage. La figure 5.4 illustre les liens entre les différentes parties d'un système de stockage inertiel. Le mécanisme de stockage d'énergie est spécifié par les phases suivantes :

- Phase de stockage : le moteur convertit l'énergie électrique entrante en énergie cinétique, ce qui augmente la vitesse de rotation de la masse.
- Phase stationnaire : c'est la conservation de l'énergie où la vitesse de rotation de la masse doit être maintenue constante et l'apport d'énergie est alors minime et ne fait que compenser les pertes liées au frottement.

- Phase de déstockage ou de restitution, le générateur convertit l'énergie mécanique en électricité en freinant ainsi la masse du volant

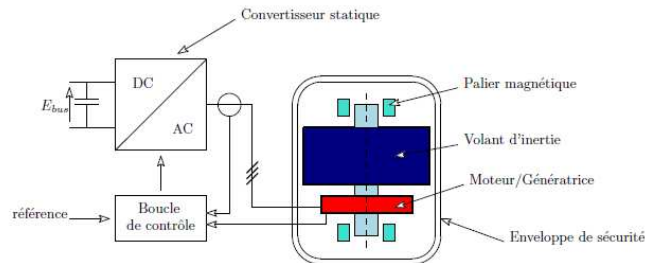


Figure 5-4 Système de stockage inertiel

(i) Applications du stockage inertiel

Les applications possibles pour les volants d'inertie sont nombreuses. Parmi elles figurent :

- La régulation de fréquence et le soutien en tension sur les réseaux électriques en maintenant la fréquence et la tension autour des valeurs moyennes et dans des limites définies par l'opérateur du réseau.
- Le lissage de la production des énergies renouvelables en compensant les fluctuations de la production électrique liées à l'intermittence de la source d'énergie (passage d'un nuage, fin d'une rafale de vent, etc.).
- Le suivi de charge en accompagnant de façon temporaire les variations journalières d'appel de puissance sur le réseau électrique, par exemple au début ou à la fin de l'heure de pointe pendant le temps où les modes de production à grande échelle démarrent ou s'arrêtent.
- Les applications décentralisées en optimisant l'utilisation de l'énergie par récupération de l'énergie de freinage de métros ou de l'énergie potentielle de pesanteurs de grues ou garantir l'alimentation sans coupure (UPS – Uninterruptible Power Supply) qui consiste à assurer le relai entre l'instant de l'incident et le démarrage du générateur de secours.

(ii) Inconvénients du stockage inertiel:

Temps de stockage est limité (environ 15 minutes). Le stockage d'énergie par volant d'inertie est utile pour la régulation et l'optimisation énergétique d'un système, il ne permet pas d'obtenir une durée d'autonomie importante comme les batteries électrochimiques ou le stockage d'énergie par pompage/turbinage.

5.3.2 Super-capacité

Les super-capacités (capacité à double couche) sont des composants dont le principe de fonctionnement est basé sur celui des condensateurs classiques, mais dont la technologie est issue de celles des batteries électrochimiques. Ils offrent des performances supérieures à celles des batteries en densité de puissance et des densités énergétiques plus élevées que les condensateurs. Cette technologie impose l'utilisation des convertisseurs d'électronique de puissance.

5.3.3 Inductance supraconductrice (SMES Superconducting Magnet Energy Storage)

Les SMES sont des stockages magnétiques qui utilisent des matériaux supraconducteurs fonctionnant à très basse température, ce qui permet d'avoir une résistance quasi-nulle. L'absence de résistance dans les conducteurs permet de stocker de l'énergie dans un bobinage court-circuité sur lui même pendant un temps théoriquement infini, voir figure 5.5. La complexité de ce type de stockage réside dans la nécessité d'avoir un système de réfrigération, lequel système est commercialisé notamment aux Etats- Unis. Ce type de stockage a été utilisé pour la stabilisation des réseaux (contrôle des puissances active et réactive) ou pour améliorer la qualité du réseau [1]. Cette technologie se situe encore au stade de la recherche et du développement.

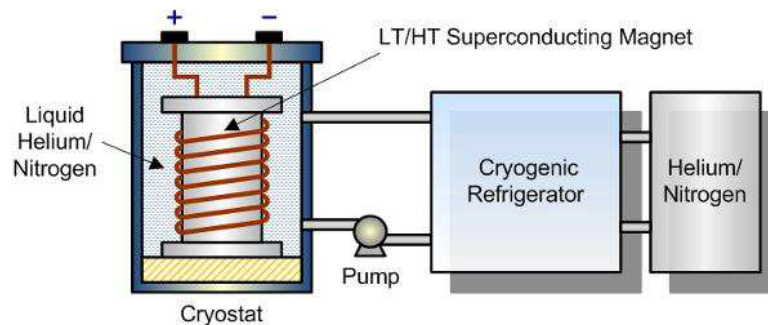


Figure 5.5 Stockage magnétique (SMES)

5.4 Comparaison des systèmes de stockage d'énergie

Nous allons sélectionner le système de stockage le mieux adapté à chaque type d'exploitation. Pour cela, nous nous appuyons sur le diagramme de Ragone de la figure 5.6 construit à partir des données des tableaux de synthèse [2]. Ce diagramme de Ragone montre clairement que les

supercondensateurs et les systèmes de stockage inertiel peuvent être rechargés en moins de quelques secondes à quelques minutes : ils occupent la partie supérieure gauche du plan de Ragone. Par contre, ce diagramme montre également que les systèmes utilisant des batteries et des piles à combustible sont mieux adaptées pour une recharge à plusieurs heures, soit une recharge pendant la nuit : ils occupent la partie inférieure droite du plan de Ragone. Un Comparatif vis-à-vis de critères de type utilisateur est établi selon les deux critères spécifiés ci-après : critères techniques et critères économiques et sociaux.

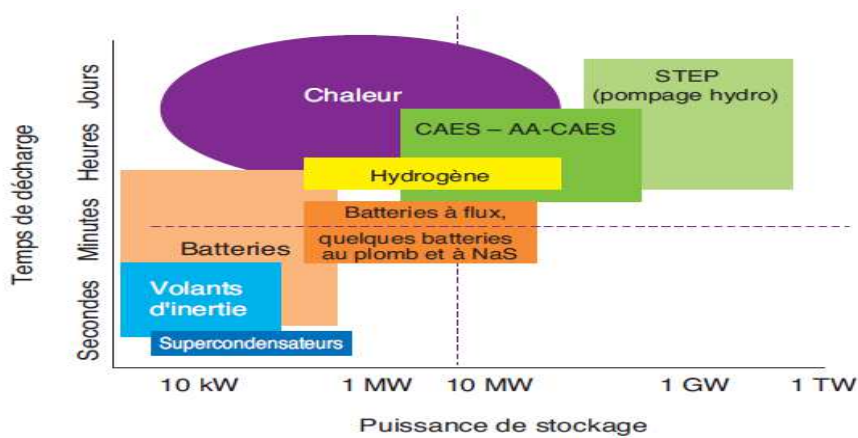


Figure 5.6 Diagramme de Ragone[2]

1. Critères techniques :

La puissance disponible et la capacité énergétique dont la combinaison de leur critère permettent de définir le ratio énergie/puissance correspondant au temps de décharge réalisable, souvent caractéristique d'une application particulière.

L'état de charge SOC (State Of Charge) du dispositif de stockage est défini comme le rapport de l'énergie stockée sur la capacité énergétique :

$$SOC \text{ (en \%)} = W_{stock} / W_{max} \quad 5-1$$

La profondeur de décharge *PDC* est donnée par

$$PDC \text{ (en \%)} = (W_{max} - W_{stock}) / W_{max} \quad 5-2$$

$$(W_{max} - W_{stock}) / W_{max} = 1 - SOC \quad 5-3$$

P_{\max} (en W) est la puissance maximale pouvant être fournie ($P > 0$ en décharge) ou reçue ($P < 0$ en charge) par le moyen de stockage.

- Le temps de réaction est un indicateur de la réactivité du moyen de stockage. Il est parfois préférable de définir la vitesse de montée et de descente en charge qui caractérise de manière plus fine le comportement réactif du système ;

2. Critères économiques et sociétaux:

- Les coûts d'investissement et d'exploitation ;
- Les performances et contraintes environnementales ;
- La localisation géographique et les pertes induites par le transport.

5.5 Les rôles du stockage de l'énergie

Les progrès qui réduisent considérablement les coûts des systèmes de stockage de l'électricité pourraient entraîner des changements dans la conception et le fonctionnement du système électrique. Le stockage améliore la viabilité des ressources énergétiques renouvelables. En effet, ce dernier en combinaison avec des sources renouvelables, il est considéré comme une solution alternative à la production fossile en fournissant un « tampon » pendant les périodes de fluctuations de production d'énergie renouvelable.

Du point de vue du gestionnaire de réseau, le stockage distribué a le potentiel de réduire les charges de pointe. Pendant les périodes de pointe, chaque kWh d'énergie consommée par le stockage en local est un kWh fourni de moins par le réseau.

Il peut aussi contribuer à accroître l'offre globale d'énergie pendant les périodes de pointe, à un coût moindre que par d'autres sources de production. Des systèmes de stockage de l'énergie combinés avec l'électronique de puissance avancée (l'électronique de puissance fait souvent l'interface entre les systèmes de stockage de l'énergie et le réseau électrique) ont un grand rôle technique et présentent de nombreux avantages mentionnés en deux points donnés ci-après.

1. Le lissage de charge

Les systèmes de stockage sont un moyen :

- De lisser la puissance active injectée sur le réseau par un moyen de production d'énergies renouvelables (EnR), par essence intermittent.

- De reporter la production d'énergie des périodes de faible demande en électricité vers les périodes de forte demande. Cela permet ainsi une meilleure gestion du parc de production (voire des installations de production moins grande) et une réduction de l'utilisation des moyens de production thermique de pointe (charbon, gaz, fioul).

2. Le maintien voire l'amélioration de la qualité d'alimentation

Les technologies de stockage permettent :

- La fourniture de réserves de puissance active rendant possible la participation au réglage de la fréquence du réseau et/ou au mécanisme d'ajustement.
- L'absorption ou la restitution de la puissance réactive pour la régulation de la tension.
- La gestion de congestions ponctuelles sur le réseau.
- D'assurer en permanence une bonne alimentation en électricité en se substituant aux moyens de production tels que les centrales thermiques.

L'état avancé des recherches dans le domaine éolien montre une volonté de développer des systèmes permettant de faciliter l'insertion dans le réseau électrique et la gestion des parcs éoliens. Les dispositifs de stockage permettent de lisser les variations de puissance en offrant toujours plus de services aux gestionnaires du réseau. L'un des objectifs poursuivis est de permettre aux sources renouvelables de passer du statut de « charge négative » à celui de générateur actif non perturbateur, participant au service-système par l'équilibre consommation-production.

Cet axe fort dans le développement des réseaux intelligents fait l'objet d'une littérature dense et d'évolutions significatives à l'heure actuelle en faveur de l'associations EnR variable(s) et stockage(s).

5.6 Participation aux services du système électrique

La littérature concernant les applications et la valeur du stockage est extrêmement riche et en très nette expansion à l'heure actuelle. Dans cette section, nous proposons de présenter un certain nombre d'approches de dimensionnements, en vue de nous aider dans nos choix futurs. Nous chercherons à extraire de la littérature les approches nous semblant les mieux adaptées à notre

problématique. Il sera important de mettre en œuvre la meilleure technologie au bon endroit et au bon moment.

Des centrales multi-sources/multi-stockages à base d'EnR sont également développées à l'heure actuelle, comme présenté par [16-18]. L'objectif est d'associer des stockages hautes puissances et hautes énergies avec des sources variables et difficilement prévisibles, de façon à reproduire des comportements proches de groupes classiques : production garantie, lissage des fluctuations court terme, contribution aux service-systèmes, etc.

5.6.1 La participation au Réglage de la fréquence

La contribution des technologies du stockage distribué au réglage de la fréquence fait l'objet d'études et d'expérimentations depuis une trentaine d'années. Toutefois, l'arrivée à maturité d'une nouvelle génération de volants d'inertie, des supercondensateurs et de batteries avancées, filières bien adaptées aux exigences de cette application, constitue une révolution technologique. Celle-ci a stimulé de nouvelles études principalement ciblées autour de deux configurations jugées porteuses. Suite à des travaux présentés dans la littérature montrent que les systèmes de stockage choisis pour le réglage primaire de la fréquence bâtis autour de volants d'inertie sont bien adaptés aux applications éoliennes, ces volants inerties stockent plutôt de la puissance que de l'énergie, et leurs utilisation dans les éolienne c'est pour lisser l'effet de rafales de vent espacées de quelques minutes, pas pour stocker une tempête nocturne.

La société américaine Beacon Power est considérée aujourd'hui comme le leader du marché des volants d'inertie. La société a notamment construit deux centrales opérationnelle de 20 MW aux Etats-Unis dédiées à la régulation de fréquence, voir figure 5.7



Figure 5-7 Centrale inertielle de Beacon Power [19]

Benoît Robyns et all [20] ont approuvé que l'optimisation de la stratégie de supervision doit permettre de réduire les besoins de stockage. La logique floue apparaît comme un outil intéressant pour développer le superviseur à partir d'études théoriques et expérimentales tout en intégrant l'expertise humaine, même si la simplification de celui-ci en vue d'une implantation temps réel est souhaitable. Les stratégies de supervision, relativement simples ont été présentées dans cet article où d'autres formes de stockage que le stockage inertiel peut être appliqué.

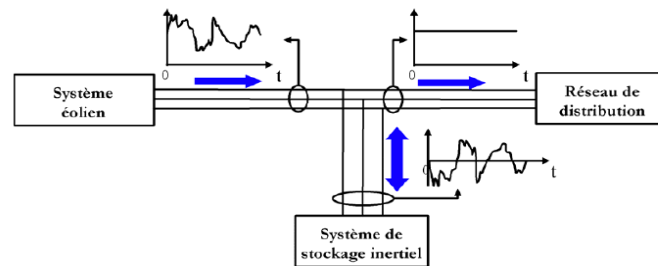


Figure. 5-8. Système de stockage inertie [29]

V. Courtcuise [1] a focalisé ses travaux, dans un premier temps, sur la capacité d'un générateur éolien à participer d'une façon régulière au réglage de la fréquence en utilisant l'énergie cinétique stockée dans les pales, sans mesure ni prévision de la vitesse du vent ni au recours à un système de stockage par deux stratégies de commande. La première stratégie, la plus simple, va permettre une participation régulière au réglage de la fréquence uniquement lorsque l'on fonctionne en pleine charge. La seconde stratégie par un superviseur multi variable basé sur la logique floue s'avérant également bien adaptée pour gérer des variables aléatoires. Ce superviseur commande simultanément le couple de référence et l'angle de calage des pales en permettant de maintenir une réserve de puissance régulière sur une large plage de variation de la vitesse du vent sans utiliser la mesure de cette vitesse. Ces deux stratégies ont été validées sur un banc d'essais expérimental de 2,2 kW puis les intégrer dans le logiciel EUROSTAG.

Par contre pour faire face à des variations de consommation plus importantes, des travaux sont dédiés à la supervision à base de la logique floue pour déterminer en temps réel la puissance de référence de chaque unité constituant la centrale multisource afin de tenir les engagements en terme de puissance délivrée, et de garantir les service-systèmes pour lesquels la centrale multisource s'est engagée. La supervision temps réel implique de limiter les temps de calcul des algorithmes de supervision et de limiter au maximum le nombre de grandeurs à mesurer.

L'étude de **A. Boyette** [21] est très proche de la configuration que nous souhaitons étudier à l'avenir, il a été montré que l'association d'une éolienne avec un système de stockage hybride alliant à long terme présenté par des batteries et à court terme par stockage inertiel afin de maintenir au mieux une puissance constante fournie au réseau. Cependant, les difficultés rencontrées sont dans les simulations dont le temps de calcul peut varier considérablement selon le logiciel utilisé. La durée de ces calculs est due au fait que le pas de calcul est très long. Et il est prouvé aussi par la modélisation et la simulation que le système de conversion éolien permet d'offrir des services-systèmes comme la compensation de facteur de puissance ou la minimisation de courants harmoniques présents dans le réseau, voir figure 5.9.

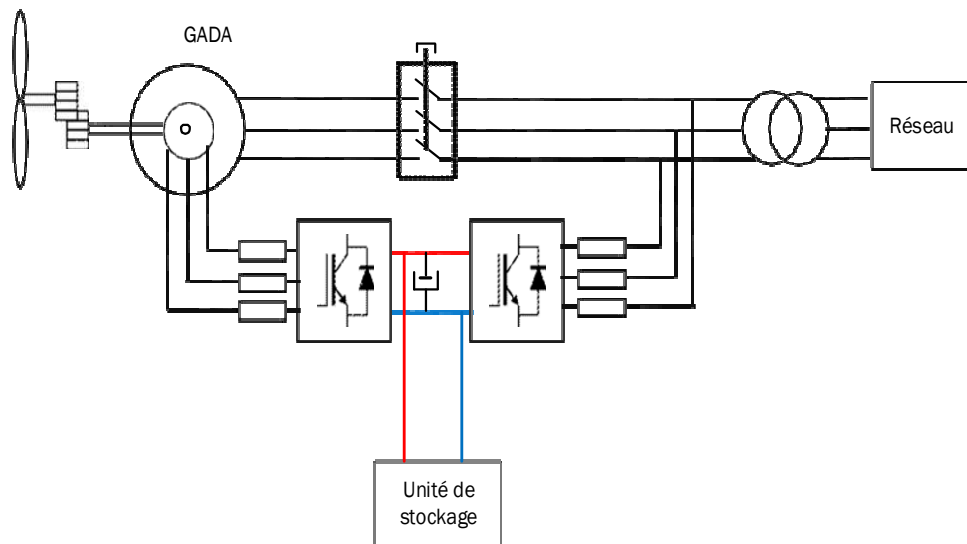


Figure 5.9 Système de production éolien avec stockage

Dans **J.P. Barton, D.G. Infield**, [22], ils ont montré que l'association de 300 kW de stockage inertiel avec une capacité d'au moins 10 minutes à une éolienne de 1 MW, connectée à un réseau rural avec une puissance de court-circuit relativement faible de 10 MVA au point de connexion permet d'augmenter de 10 % l'énergie pouvant être injectée dans le réseau grâce à l'amélioration de la qualité de la puissance générée. Les auteurs précisent ensuite que le stockage inertiel est la solution la plus économique dans ce type d'application, et qu'il devrait permettre une augmentation de revenu de 14 000 \$ par an. Dans le cas d'une connexion au réseau, le stockage à long terme reste

encore très coûteux et peut être particulièrement valorisé en stockant l'électricité produite par les éoliennes durant les heures creuses, où l'électricité est la moins chère, et en la restituant durant les heures de pointe lorsqu'elle est la plus chère.

5.6.2 La participation au réglage de la tension

Le réglage tension/réactif est réalisé sur le réseau à partir des sources de puissance réactive par les moyens passifs de compensation et par les groupes pour un réglage rapide suite aux aléas d'exploitation. Ce réglage s'appuie de façon privilégiée sur une conduite hiérarchisée à l'instar du réglage de fréquence sous deux conduites. La première conduite est par un réglage primaire rapide (quelques 100 ms) qui est automatique et local aux bornes des alternateurs synchrones. La deuxième conduite est par un réglage secondaire semi-rapide de quelques minutes en automatique et centralisé pour la coordination de l'action des groupes à une échelle régionale dont les actions tertiaires et manuelles seront accomplies à la demande du dispatching national. Plus de détails techniques sont fournis par [23-25].

Le stockage décentralisé, via son l'électronique de puissance, peut injecter ou absorber de la puissance réactive. Comme évoqué dans [26] et [27], il pourrait donc éventuellement contribuer au réglage dynamique de la tension HTB depuis la distribution, soit directement en amont de son poste source (équivalent d'un réglage primaire) soit en participant à la tenue de la tension d'un nœud pilote sur le réseau de transport (réglage secondaire).

Pour le volant d'inertie, il y a deux types possibles de régulation de la tension [19][28]:

1. Le régulateur de tension (Automatic Voltage Regulator: AVR) est capable de maintenir la tension terminale constante. Ce régulateur est souvent utilisé pour les grands volants d'inertie de très forte puissance dans le réseau de transport ou par les volants d'inertie fonctionnant en réseau séparé.
2. Le régulateur de facteur de puissance ou de puissance réactive (Power Factor : PF/VAR) est capable de maintenir le facteur de puissance ou la puissance réactive constante. Ce régulateur est souvent utilisé pour les volants d'inertie connectés aux réseaux de distribution de quelques kVA aux dizaines de MVA. Pour ce cas, on peut l'appeler la régulation P/Q (avec $Q=0$).

5.7 Conclusion

Pour faciliter l'intégration des éoliennes et l'augmentation du taux de pénétration dans les réseaux insulaires (isolés), ainsi que dans les réseaux interconnectés, il faut ajouter des systèmes de stockage d'énergie permettant d'avoir une réserve supplémentaire d'énergie afin d'assurer l'équilibre production / consommation.

Le stockage d'énergie est perçu de façon globale comme l'un des piliers techniques sur lesquels seront fondés les futurs des systèmes électriques face au nombre grandissant de contraintes technico-économiques auxquelles ils font face.

La première partie du chapitre fait une brève présentation des méthodes les plus utilisées pour le stockage de l'énergie électrique à court et long terme via une attention particulière portée sur le stockage à court terme et notamment le stockage inertiel qui effectue des lissages des pics de puissances de quelques secondes à quelques minutes (lissage des fluctuations court terme), produits par des sources intermittentes et spécialement éolienne.

La deuxième partie de ce chapitre expose des travaux présentés dans la littérature qui prouvent que le stockage inertiel contribue aux services des systèmes de réglage de la fréquence et de la tension en le combinant avec d'autre système stockage à long terme afin d'augmenter le taux de pénétration de l'éolien dans le réseau électrique.

5.8 Références bibliographiques

- [1] V. Courtecuisse, "Supervision d'une centrale multisource à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique", thèse de doctorat soutenu le 20 novembre 2008.
- [2] J. Pignault "Le stockage de l'électricité, Eléments de synthèse sur l'état de l'art et les perspectives", V5 du 29 mars 2016.
- [3] A. Ansel, B. Robyns, "Production décentralisée d'électricité au moyen d'une micro centrale hydraulique au fil de l'eau", 3EI, décembre 2004, p46-5
- [4] X. Li, L. Xu, J. Li, M. Ouyang, "Power management strategy for vehicular-applied fuel cell/battery power system", Journal of power sources, vol.191, pp.542-549, 2009.
- [5] EPRI (Electric Power Research Institute), Palo Alto, CA, and the U.S. Department of Energy, Washington, DC, "Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications", Tech. Rep. 1001834, Dec. 2003. Available: www.epri.com

- [6] V. Schwarz, B. Gindroz, "Le stockage électrochimique", Mines-Energie, Dossier Stockage de l'Énergie, Jan.- Feb. 2015. Available: www.mines-energie.org/Dossiers/Stock2015_15.pdf.
- [7] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, "du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire", Programmation pluriannuelle des investissements de production électrique Période 2009-2020, 2009.
- [8] M. Zandi, A. Payman, J. P. Martin, "Flatness based control of a hybrid power source with fuel cell / supercapacitor / battery ",IEEE Energy conversion congress and exposition (ECCEa) Atlanta (USA), pp. 1929-1634,12-16sept. 2010.
- [9] P. Bousseau, R. Belhome, E. Monnot, N. Laverdure, D. Boëda, D. Rove, S. Bacha, "Contribution of wind farms to ancillary service", CIGRE 2006, Paris, 27 août-1 septembre 2006.
- [10] D. Scaravetti, P. Sébastien, J-P. Nadeau, "Structuration d'un problème de conception préliminaire, formulation et résolution par satisfaction de contraintes, Ingénierie de la conception et cycle de vie du produit", Chapitre 7, Traité IC2, ISBN : 2-7462-1214-5, Hermès, Paris, 2006.
- [11] A. Payman, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar, "Performance Investigation and comparison of two different electrical hybrid system structure",IEEE vehicle power and propulsion conference (VPPC), pp. 412-417,sept. 2007.
- [12] M. Zandi, "Contributions au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique", thèse de doctorat soutenu 12 Nov 2010.
- [13] European Wind Energy Association "Grids integration report » December 2005
- [14] G.-O. Cimuca, "Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens", Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, 2005.
- [15] Easy Street Ramps Up Data Center Operations, Deploys Additional VYCON, "Flywheel Systems to Protect Its Green Data Center". Available online: <https://www.calnetix.com/newsroom/press-release/easystreetramps-data-center-operations-deploys-additional-vycon-flywheel> (accessed on 1 February 2017).
- [16] D. Lu, T. Zhou, H. Fackam, B. François , "Design of a power management system for an active PV station including various storage technologies", in Proc. 13th Power Electronics

- and Motion Control Conference (EPE-PEMC), Poznan, Pologne, pp. 2142-2149, Sep. 1-3, 20
- [17] P. Li, “Formalisme pour la Supervision des Systèmes Hybrides Multi-Sources de Générateurs d’Energie Répartie : Application à la Gestion d’un Micro Réseau”, thèse de Doctorat en Génie Électrique (Ph.D. dissertation), École Centrale de Lille, n° 100, Jun. 19, 2009.
- [18] T. Zhou, “Commande et Supervision Énergétique d’un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d’Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l’Intégration dans le Système Électrique d’un Micro Réseau”, thèse de Doctorat en Génie Électrique (Ph.D. dissertation), École Centrale de Lille, n° 103, Jun. 30, 2009.
- [19] C. Abbezzot, “Système inertiel de stockage d’énergie couplé au générateur photovoltaïque et piloté par un simulateur temps réel”, thèse de doctorat soutenu le 19 Jan 2016
- [20] B. Robyns, A. Davigny, “Apport du stockage de l'énergie à l'intégration des éoliennes dans les réseaux électrique”, REE N°5 Mais 2005.
- [21] A. Boyette, “Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne”, thèse de doctorat 2006.
- [22] Barton, J.P.; Infield, “Energy Storage and Its Use With Intermittent Renewable Energy”, Energy Conversion, IEEE Transaction on Volume 19, Issue 2, June 2004 Page(s): 441 – 448.
- [23] Y. Rebours, D. Kirschen, M. Trotignon, S. Rossignol, “A survey of frequency and voltage control ancillary services - Part I: Technical features”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, issue 1, pp. 350-357, Feb. 2007.
- [24] T. Margotin, P. Juston, M. P. Houry, “Les services système : l’expérience de RTE”, J3eA, vol. 5 – Hors Série 1, DOI: 10.1051/j3ea:2006024, 2006.
- [25] P. Bornard, M. Pavard, G. Testud, “Réseaux d’interconnexion et de transport : réglage et stabilité”, Tech. Rep. in Techniques de l’Ingénieur, Traité de Génie Électrique, ref. D4092, Aug. 2005
- [26] EPRI (Electric Power Research Institute), “Energy Storage Technology Valuation Primer: Techniques for Financial Modeling”, Tech. Rep. 1008810, Dec. 2004. Available: www.epri.com.

- [27] J. Eyer, G. Corey, “Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide – A Study for the DOE Energy Storage Program”, Sandia National Laboratories, Tech. Rep. SAND10-0815, Feb. 2010. Available: <http://www.osti.gov>.
- [28] T. Tran-Quoc, S. Bacha, “Interactions onduleur PV/réseau Investigations sur les services apportés par les onduleurs PV”, projet ESPRIT, 2011
- [29] L. Leclercq, “Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d’assurer des services systèmes ”, Thèse de doctorat soutenue au Laboratoire d’Electrotechnique et d’Electronique de Puissance de Lille, 14 décembre 2004.

CONCLUSION GÉNÉRALE

6-1 Résumé–Bilan

Le travail présenté dans cette thèse porte sur la commande d'une génératrice asynchrone notamment la génératrice asynchrone double alimentée (GADA), utilisée comme un aérogénérateur éolien qui considéré comme l'élément clé de la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ce travail a été focalisé beaucoup plus sur des approches de commandes directes suffisamment robustes de la dite machine, outre que les commandes vectorielles à flux et tension orientés. Cela a permis d'acquérir des avantages relatifs aux performances dynamiques notamment avec une réduction du temps de calcul et avec une simplicité de l'algorithme pour d'éventuelles implantations en temps réel. Ainsi dire, les nouvelles approches de commandes robustes proposées pour la GADA ont été destinées pour être connecté sur un site insulaire ou sur un réseau puissant et dont les deux cas l'injection des puissances étant réalisée via le stator contrôlé avec un facteur de puissance unitaire.

Au cours du premier chapitre on a retracé, un bref historique sur l'éolien suivi d'un exposé sur les statistiques de l'exploitation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité à travers le monde et particulièrement en Algérie en montrant les sites éoliens potentiels.

L'aérogénérateur asynchrone via une éolienne occupe une position importante dans l'emplacement des aérogénérateurs producteurs de l'énergie électrique à cause de leurs simplicités et de leurs robustesses et dont l'intérêt est consenti pour la vitesse variable. L'apport de l'électronique de puissance en matière de convertisseur est alors primordial pour assurer des contrôles/commandes avec adaptation des flux de puissances demandées.

Le deuxième chapitre fut consacré assurément à la modélisation à la formulation complexe d'une génératrice asynchrone sous ces deux versions simple et double alimentées. La génératrice asynchrone simple alimentée est une machine à cage d'écureuil (GAS) dont la magnétisation lui est fournie par une batterie de condensateurs correctement dimensionnés pour réaliser les conditions de l'autoamorçage, ce qui n'est pas le cas pour la génératrice asynchrone double alimentée (GADA/MADA) dont la magnétisation est occasionnée par les deux armatures sans qu'elle soit très saturée comme le cas de la GAS. La modélisation de la machine asynchrone sous sa formulation complexe préconise un gain d'intérêt orienté sur le temps de calcul requis aussi bien en commande qu'en observation.

Déjà en boucle ouverte (chapitre 2), la GADA dans ses deux versions de fonctionnement moteur ou générateur s'avère délicate à commander sans le processus du contrôle feedback. Ainsi l'injection des tensions en amplitude et en fréquence doivent être injectées dans le sens que la dérivée de l'angle de charge entre les deux forces magnétomotrices (f_{mm}) du stator et du rotor doit être nulle, c'est-à-dire offrant la possibilité de réaliser une parfaite démodulation parfaite des grandeurs continues telles que le couple et la vitesse en offrant à la machine plus de stabilité. Donc, par là il devient impératif de la contrôler en boucle fermée en assumant à réduire les couplages.

Le troisième chapitre a pour objectif de présenter une nouvelle approche algorithmique de la modulation vectorielle de la largeur d'impulsion, appelée *ISVM (Imaginary Space Vector Modulation)*, pilotant un onduleur à deux niveaux pour commander une génératrice asynchrone double alimentée. Cette approche étant facilement implantable pour la mise en œuvre d'un contrôle bouclé avec un temps de calcul réduit, ce qui présente un grand avantage pour les commandes en temps réel. Le traitement de l'algorithme peut constituer une première en terme d'implantation où l'on a à considérer le temps en seconde en ordonnée et en abscisse, soit alors le temps versus temps ! Subséquemment, la technique *ISVM* emploie seulement les tensions de phase de référence instantanées pour sa mise en œuvre sans estimation de l'angle de vecteur de référence ni la localisation des secteurs requis par la SVM conventionnelle. Ainsi période de commutation se trouve amplement suffisante. Ainsi dire, l'usage global du complexe 2D est d'une importance capitale pour gagner à la fois en temps de calcul et aussi sans atténuer

l'amplitude de la tension de référence sinusoïdale (modulatrice) à la sortie de l'onduleur avec un THD relativement réduit.

Le quatrième chapitre est exposé dans un premier temps les commandes de la génératrice asynchrone type scalaire et vectorielle et dont les performances peuvent être dégradées lors des variations paramétriques et de la non linéarité du contrôle des puissances qui survient. L'intérêt a été donc de s'orienter vers l'usage de nouvelles approches plus robustes pour résorber certains problèmes non linéaires et donc apporter les performances désirées au système. Permet ces approches de commandes sont les suivantes :

- ❖ Commande par retour d'état complexe de la tension de stator d'une GADA pour un site isolé
- ❖ Commande directe de puissance apparente S ou en anglais "*S-Power*"-control pour une GADA connectée sur un réseau puissant.

Ces deux approches de commandes directes et découplées des puissances ont prouvé par simulation leur robustesse et qu'elles sont moins sensibles aux variations paramétriques et permettant d'acquérir des avantages relatifs aux performances dynamiques surtout en temps de calcul réduit et notamment avec l'utilisation de l'algorithme de la modulation vectorielle *ISVM*.

Enfin dans le cinquième et dernier chapitre nous avons exposé un état de l'art sur le stockage d'énergie en suscitant à mettre en relief les avantages et inconvénients des différentes technologies employées pour élucider notamment les différentes problématiques occasionnées. Ainsi et grâce à l'apport du stockage d'énergie, les énergies renouvelables peuvent devenir compétitives par rapport aux sources d'énergie fossile.

6-2 Apports

A travers ce paragraphe nous tenons à souligner les apports consentis de cette thèse:

- La modélisation à formulation complexe d'une machine asynchrone simple et double alimentée dont les bénéfices sont impactés sur le temps de calcul requis aussi bien en commande qu'en observation (Chapitre 2).
- Une nouvelle technique permettant de dégager une MLI ayant les performances acquises d'une SVM avec la particularité d'être aisément implantable en temps réel, notamment en expérimental, avec un minimum de temps de calcul (Chapitre 3)
- Deux nouvelles approches de commandes robustes d'une GADA. La première commande est celle donnée par retour d'état complexe pour une GADA alimentant un site isolé. La seconde commande appelée la commande "*S-Puissance*" contrôlant directement la puissance

apparente au niveau du stator d'une génératrice asynchrone double alimentée connectée sur un réseau.

6-3 Perspectives

Les perspectives du travail de recherche de cette thèse sont toujours ouvertes dans le domaine des énergies renouvelable. Elles peuvent viser prochainement l'association d'une éolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimenté au stockage hybride pour qu'elle puisse participer au service-système.

ANNEXE A**A.1 Données de la machine à induction (simple & double alimentée)**

Valeurs nominales : 4 kW ; 220/380 V ; 50 Hz ; 15/8.6 A, 1440 rpm

Paramètres:

$$R_S \text{ (Résistance du stator)} = 1.2 \Omega$$

$$R_R \text{ (Résistance du rotor)} = 1.8 \Omega$$

$$L_S \text{ (Inductance du stator)} = 0.1554 \text{ H}$$

$$L_R \text{ (Inductance du rotor)} = 0.1568 \text{ H}$$

$$M \text{ (Inductance mutuelle)} = 0.15 \text{ H}$$

Constantes mécaniques:

$$J \text{ (Inertie du rotor)} = 0.2 \text{ kg.m}^2$$

$$f \text{ (Coefficient de frottement)} = 0.00 \text{ I.S.}$$