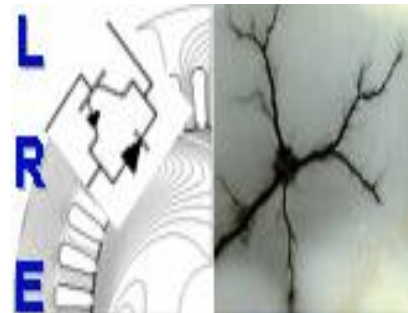


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electrotechnique Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'
Ingénieur d'état en électrotechnique

Intitulé

Etude du Système de Protection du Générateur Asynchrone à Double Alimentation Suite à un Creux de Tension

Présenté par
Nasreddine KESBIA et Youcef AZROU-ISGHI

Sous la direction de **Pr. S. Mekhtoub**
soutenu publiquement le 15 juin 2016

Membres du Jury

Président : R. Ibtouen, Professeur à l'ENP
Rapporteur : S. Mekhtoub, Professeur à l'ENP
Examineur : T. Zebbadji, Docteur à l'ENP
R. Tahmi, Maitre de Conférences à l'ENP

ENP 2016

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

ملخص

الطاقة الهوائية تمثل بديل جيد لمصادر الطاقة الحرارية، لكن المولدات الامتزازية المستعملة في المولدات الهوائية تعاني من الاضطرابات المتواجدة على مستوى شبكة التوزيع لاسيما نقص التوتر. في هذا العمل نهتم بنمذجة والتحكم في الالة الامتزازية ثنائية التغذية. بعد هذا قمنا بدراسة سلوك هذا المولد اثناء نقص التوتر وقمنا بمقارنته بالمولد الامتزاز ذو السرعة الثابتة. ثم نقترح طريقة لحماية المولد ثنائي التغذية تسمح له بالعمل اثناء نقص في التوتر.

كلمات مفتاحية: الة لامتزازية ثنائية التغذية، مولد لامتزاز ذو سرعة ثابتة، نقص التوتر، كرا وبار، محول جهة الروتور، محول جهة الشبكة، التحكم الشعاعي.

Abstract

The wind power is considered as the best alternative to the conventional energies. However, the induction generators used in wind turbines suffer from grid disturbances, specially the voltage dips. In this work, we are interested on the modeling and control of double fed induction generator, a study of the transients of the DFIG during the voltage sags was detailed and compared to the induction generator. We propose a protection system for the DFIG, this system will allow the generator to stay connected to the grid in case of voltage dips.

Key word: DFIG, Induction generator, Voltage sags, Crowbar, RSC, GSC, flux oriented control.

Résumé

L'énergie éolienne constitue une bonne alternative aux énergies fossiles. Cependant, les machines asynchrones utilisées dans les aérogénérateurs souffrent des perturbations du réseau, notamment le creux de tension. Ce travail porte sur la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation, une étude du comportement de la MADA durant le creux de tension a été détaillée et comparée avec le générateur à vitesse fixe. Nous proposons par la suite un système de protection qui permet à la MADA de rester connectée au réseau en cas des creux de tension.

Mots clés: MADA, GAS, Creux de tension, Crowbar, CCR, CCM, commande vectorielle.

Remerciements

Au terme de ce travail,

Nous adressons nos remerciements à Monsieur Said Mekhtoub, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour l'appui scientifique et sa disponibilité durant la préparation de notre projet de fin d'études ainsi que pour tous le savoir qu'il nous a transmis durant nos années à l'ENP.

Nous tenons également à remercier Monsieur le Professeur Rachid Ibtouen, Chef Département d'Electrotechnique, de nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Nous remercions aussi Monsieur Taher Zebbadji, Enseignant à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.

Nous remercions aussi Monsieur Redouane Tahmi, Enseignant à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.

Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique spécialement ceux du département de l'électrotechnique, pour leur encadrement tout au long de notre formation.

Je dédie ce présent travail à mes très chers parents qui m'ont aidé et soutenu tout au long de mon parcours. Sans eux, je ne serai pas là aujourd'hui.

Je dédie ce travail également :

A mes chouchous Hasnaa et Oussama

A mes sœurs hanane et Habiba

Sans oublier Nabil

A toute ma famille

A tous mes amis

infiniment

Merci

N. KESBIA

Table des matières

Introduction générale	12
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES AEROGENERATEURS	13
I.1. Introduction	14
I.2. Energie éolienne, structures et fonctionnement	14
I.2.1. Principe de fonctionnement	14
I.2.2. Types d'éoliennes	14
I.3. Composants de l'éolienne	16
I.4. Différentes configurations des générateurs éoliens.....	16
I.4.1. Générateurs à vitesse fixe	16
I.4.2. Générateurs à vitesse variable.....	17
I.5. Impact de l'énergie éolienne sur le réseau	19
I.6. Conclusion.....	20
CHAPITRE II : MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION	21
II.1. Introduction	22
II.2. Description et modes de fonctionnement de la MADA	22
II.2.1. Description de la MADA	22
II.2.2. Modes de fonctionnement de la MADA :	23
II.3. Modèle de la MADA dans le plan ABC.....	24
II.3.1. Hypothèses simplificatrices	25
II.3.2. Equations électriques de la machine :	25
II.3.3. Equations des flux :	26
II.3.4. Equation mécanique :	26
II.4. Modèle linéaire de la MADA dans le plan d, q.....	27
II.4.1. La transformation de R.H.Park	27
II.4.2. Equations électriques de la MADA dans le repère d, q	28
II.4.3. Equation du couple électromagnétique :	29
II.4.4. Choix de référentiel.....	29
II.4.5. Validation du modèle linéaire :	31
II.5. Modèle saturé de la MADA dans le plan d, q	32
II.5.1. Développement spatial de flux.....	32
II.6. Conclusion.....	36
CHAPITRE III : COMMANDE DE LA CHAINE DE CONVERSION	37
III.1. Introduction.....	38

III.2.	La commande vectorielle de la MADA.....	38
III.2.1.	Expressions des puissances active et réactive.....	39
III.2.2.	Expressions des tensions.....	40
III.2.3.	Différentes méthodes de la commande vectorielle.....	41
III.3.	Modélisation de l'interconnexion au réseau.....	43
III.3.1.	Modélisation de l'onduleur côté machine et côté réseau.....	43
III.3.2.	Modélisation de bus continu.....	45
III.3.3.	Modélisation du filtre passif.....	46
III.4.	Commande des convertisseurs d'EP.....	47
III.4.1.	Commande de convertisseur côté machine (CCM).....	47
III.4.2.	Commande de convertisseur côté réseaux (CCR).....	49
III.5.	Simulation de la chaine de conversion.....	54
III.5.1.	Résultats de simulation :.....	55
III.5.2.	Interprétations.....	57
III.6.	Conclusion.....	57
CHAPITRE IV : ANALYSE ET PROTECTION DE LA MADA DURANT LE CREUX DE TENSION.....		58
IV.1.	Introduction.....	59
IV.2.	Analyse de la MADA durant un creux de tension.....	59
IV.2.1.	Définition d'un creux de tension.....	59
IV.2.2.	Simulation de la MADA durant un creux de tension.....	60
IV.2.3.	Interprétations des résultats.....	63
IV.3.	Recommandations des Grid codes.....	64
IV.3.1.	Puissance active.....	64
IV.3.2.	Puissance réactive.....	64
IV.3.3.	Les marges de fréquences de fonctionnement.....	64
IV.3.4.	Comportement durant le creux de tension.....	64
IV.4.	Protection de la MADA durant le creux de tension.....	65
IV.4.1.	Technique de protection durant le creux de tension.....	65
IV.4.2.	Crowbar avec résistance rotorique et détection par critère de tension.....	66
IV.4.3.	Crowbar hybride.....	79
IV.5.	Comparaison avec le générateur à vitesse fixe.....	82
IV.5.1.	Autoamorçage du générateur à vitesse fixe.....	83
IV.5.2.	Accrochage au réseau de distribution de l'énergie électrique.....	84
IV.5.3.	Application du creux de tension de tension à la machine.....	86
IV.6.	Conclusion.....	88
Conclusions générales et perspectives.....		89
BIBLIOGRAPHIE.....		90

Nomenclature

MADA : Machine asynchrone à double alimentation

MAS : Machine asynchrone

GAS : Générateur asynchrone

CCR : Convertisseur côté réseau

CCM : Convertisseur côté machine

LVRT: Low Voltage Ride Through (Comportement durant le creux de tension)

FRT: Fault Ride Through (comportement durant un défaut)

Liste des symboles

V_s : Tension simple statorique

V_r : Tension simple rotorique

V_d : Tension suivant l'axe d

V_q : Tension suivant l'axe q

R_s : Résistance de l'armature statorique

R_r : Résistance de l'armature rotorique

I_s : Courant statorique

I_r : Courant rotorique

ϕ_s : Flux statorique

ϕ_r : Flux rotorique

ϕ_d : Flux suivant l'axe d

ϕ_q : Flux suivant l'axe q

ω_s : Pulsation statorique

ω_e : Pulsation du repère

ω_r : Pulsation rotorique

g : Glissement

L_{ss} : Inductance statorique

L_{rr} : Inductance rotorique

M_{sr} : Mutuelle inductance stator rotor

L_s : Inductance cyclique statorique

L_r : Inductance cyclique rotorique

L_d : Inductance saturable suivant l'axe d
 L_q : Inductance saturable suivant l'axe q
 M : Mutuelle inductance cyclique
 Γ_e : Couple électromagnétique
 J_s : Moment d'inertie
 f_r : Coefficient de frottement visqueux
 Ω : Vitesse de rotation
 $P(\theta)$: Matrice de transformée de R.H.Park
 $P^{-1}(\theta)$: Matrice de transformée inverse de R.H.Park
 M_{st} : Mutuelle inductance statique
 M_{dy} : Mutuelle inductance dynamique
 L_{dq} : Inductance d'interaction entre l'axe d et q
 β : Position
 ϕ_m : Flux magnétisant
 P : Puissance active
 Q : Puissance réactive
 V_{dc} : Tension de bus continu
 I_{mac} : Courant modulé par le convertisseur côté machine
 I_{ond} : Courant modulé par le convertisseur côté réseau
 I_c : Courant absorbé par le condensateur
 C : Capacité
 R_f : Résistance du filtre
 L_f : Inductance du filtre

Liste des figures

Figure I-1: Eolienne à axe vertical	14
Figure I-2: Eolienne à axe horizontal	14
Figure I-3: Composants d'une éolienne	16
Figure I-4 : Générateur asynchrone à vitesse fixe	17
Figure I-5: Générateurs à vitesse variable	17
Figure I-6 : Variation de vitesse par dissipation rotorique	18
Figure I-7: Variation de vitesse par pilotage au stator	18
Figure I-8 : Variation de vitesse par double alimentation stator-rotor	19
Figure I-9: pic de courant lors de l'accrochage d'un générateur asynchrone à vitesse fixe sur le réseau	20
Figure II-1: Constituants d'une machine asynchrone à double alimentation	22
Figure II-2: Modes de fonctionnement de la MADA	23
Figure II-3: Représentation schématique de la machine asynchrone.....	25
Figure II-4: Passage du plan ABC vers d, q.....	27
Figure II-5: Résultats de simulation de démarrage de la machine asynchrone.....	31
Figure II-6: Représentation des vecteurs courants et flux magnétisants	32
Figure II-7: Relevé expérimental de flux magnétisant en fonction du courant	34
Figure II-8: Comparaison entre les résultats de simulation de démarrage de la MAS entre le modèle saturé et linéaire	36
Figure III-1: Schéma représentant le système des puissances	41
Figure III-2: Schéma en bloc de la commande vectorielle direct des puissances de la MADA	42
Figure III-3: Schéma en bloc de la commande vectorielle indirect de puissance de la MADA	42
Figure III-4: Schéma d'un onduleur de tension à deux niveaux	43
Figure III-5: Les différents signaux de commande des interrupteurs	45
Figure III-6: Schéma représentatif de bus continu	45
Figure III-7: Schéma équivalent de la liaison au réseau	47
Figure III-8: Schéma représentant les stratégies de commande des convertisseurs associés à la MADA	47
Figure III-9: Puissance réactive	47
Figure III-10: Puissance active	48
Figure III-11: évolution du courant statorique	48
Figure III-12 : évolution du courant rotorique	49
Figure III-13: Liaison de CCR au réseau	50
Figure III-14: Contrôle des courants côté réseau	51
Figure III-15: Schéma de régulation de bus continu	52
Figure III-16: Puissances envoyées au réseau	52
Figure III-17: Tension de bus continu.....	52

Figure III-18: Courants de réseau suivant	52
Figure III-19: Courant modulé par l'onduleur	53
Figure III-20 : Courants de ligne.....	53
Figure III-21 : Tension simple et courant de ligne.....	53
Figure III-22 : Tension de l'onduleur MLI	53
Figure III-23: Représentation schématique du système de conversion électromécanique	54
Figure III-24: Les puissances échangées entre la MADA et le réseau	55
Figure III-25: Vitesse et couple développées par la MADA	55
Figure III-26: Les courants circulant dans la MADA	56
Figure III-27: Tension de bus continu et énergie réactive	56
Figure IV -1: Creux et coupure de la tension de réseau.....	60
Figure IV -2: Creux de tension de 80%	60
Figure IV -3: Les courants statorique durant le creux de tension	60
Figure IV -4: Les courants rotoriques durant le creux de tension.....	61
Figure IV -5: Tension du bus continu et les courants dans les convertisseurs statiques durant le creux de tension	61
Figure IV -6: La vitesse et le couple électromagnétique durant le creux de tension	62
Figure IV -7: Puissances active et réactive échangées avec le réseau durant le creux de tension	62
Figure IV -8: l'énergie réactive durant le creux de tension	62
Figure IV -9: puissances active et réactive échangées entre le CCR et le réseau durant le creux de tension	63
Figure IV -10: Recommandation du Grid code pour le LVRT [24]	65
Figure IV -11: Schéma de principe de protection par crowbar [14]	66
Figure IV -12: Organigramme illustrant la technique de commande de crowbar	67
Figure IV -13: Creux de tension de 80%	67
Figure IV -14: Courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar	68
Figure IV -15: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar	68
Figure IV -16: Tension de bus continu et les courants dans les convertisseurs statiques avec protection crowbar	69
Figure IV -17: Puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar	69
Figure IV -18: l'énergie réactive avec protection crowbar.....	70
Figure IV -19: courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar	70
Figure IV -20: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar	70
Figure IV -21: Tension de bus continu et courants des convertisseurs statiques avec protection crowbar.....	71
Figure IV -22: puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar	71
Figure IV -23: l'énergie réactive avec protection crowbar.....	72
Figure IV -24: Courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar	72
Figure IV -25: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar	72
Figure IV -26: Tension de bus continu et courants des convertisseurs avec protection crowbar	73
Figure IV -27: Puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar	73
Figure IV -28: l'énergie réactive	74
Figure IV -29: Evolution des pics des grandeurs de la MADA en fonction de l'instant du défaut....	75
Figure IV -30: Evolution des pics des grandeurs de la MADA en fonction de l'instant du rétablissement de la tension	76
Figure IV-31: Evolution des pics des grandeurs de la MADA en fonction de la résistance d'amortissement à l'instant du creux de tension	77

Figure IV -32:Evolution des pics des grandeurs de la MADA en fonction de la résistance d'amortissement à l'instant du creux de tension	78
Figure IV -33: Schéma de principe du crowbar hybride.....	79
Figure IV -34:Organigramme illustrant la commande de crowbar hybride.....	80
Figure IV -35: les instants d'activation des crowbars.....	80
Figure IV -36: courants statoriques et rotoriques avec hybride crowbar protection.....	81
Figure IV -37: Tension du bus continu et courant modulé par le CCM avec protection crowbar.....	81
Figure IV -38: comparaison entre le crowbar classique et l'hybride	82
Figure IV -39:Générateur asynchrone à vitesse fixe.....	83
Figure IV -40: Phénomène d'autoamorçage.....	83
Figure IV-41: Tension d'une phase statorique à l'amorçage.....	84
Figure IV-42: Courants statorique et rotorique à l'amorçage.....	84
Figure IV -43: Simulation de la tension et du courant statorique pendant l'accrochage.....	85
Figure IV -44:Simulation du Courant rotorique pendant l'accrochage	85
Figure IV -45: Simulation du Couple et vitesse pendant l'accrochage.....	85
Figure IV -46:Simulation des Puissances active et réactive pendant l'accrochage	86
Figure IV -47: Evolution de la tension du condensateur pendant le creux de tension.....	87
Figure IV -48: Courants statorique et rotorique pendant le creux de tension.....	87
Figure IV -49: Couple et vitesse pendant le creux de tension	87
Figure IV -50: Puissances active et réactive pendant le creux de tension	88

Introduction générale

Face à la demande croissante de l'énergie électrique par les domestiques et les industriels, plusieurs pays se sont lancés dans l'exploitation d'autres sources d'énergie que les énergies conventionnelles. La pollution atmosphérique et les phénomènes qui l'accompagnent : effet de serre, pluies acides, la pollution des énergies conventionnelles... plusieurs pays se sont lancés dans le domaine des énergies renouvelables cherchant à exploiter des sources propres dans la perspective de préservation de l'environnement.

L'énergie éolienne est considérée comme la plus prometteuse parmi d'autres sources d'énergie renouvelables. L'exploitation de l'énergie du vent a commencé avec des éoliennes de quelques dizaines de kilowatts durant les années 1980, pour atteindre aujourd'hui des puissances de 6-10MW. En 2012, la capacité mondiale des éoliennes s'est évaluée à 282GW et compte atteindre les 760GW en 2020 [33]. Les fermes éoliennes ont un impact direct sur la stabilité du réseau électrique auquel elles sont directement reliées [28]. Plusieurs générateurs éoliens faisant appel à des technologies avancées et de système d'électronique de puissance sont installés pour améliorer la qualité de l'énergie et avoir un comportement similaire aux sources d'énergies conventionnelles [24].

Aujourd'hui nous faisons appel de plus en plus à des générateurs asynchrones lors de la conception des aérogénérateurs, vu qu'elles offrent des avantages du côté optimisation de l'énergie générée et du faible coût du kilowattheure [29].

Cependant, les générateurs asynchrones sont sensibles aux perturbations sur le réseau, ce comportement peut avoir un effet néfaste sur l'ensemble de la chaîne de conversion éolienne et un impact sur le réseau de distribution [17, 26].

Le présent mémoire porte sur l'étude du régime transitoire des générateurs asynchrones lors du creux de tension qui est considéré comme le défaut le plus sévère pour ce type de machines. Pour arriver à une prédiction exacte du comportement du générateur lors du défaut, nous avons établi un modèle mathématique de la chaîne de conversion éolienne qui tient compte d'un maximum de phénomènes physiques.

Dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu général sur les différentes structures des systèmes éoliens en citant les avantages et les inconvénients pour chaque structure qui permettra de choisir la structure appropriée.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation sous des hypothèses simplificatrices de la machine asynchrone dans le repère naturel et dans le repère de R.H.Park. Un modèle sous l'hypothèse de linéarité, a été présenté qui sert à la synthèse de la structure de commande et au calcul des régulateurs [13]. Un second modèle basé sur le phénomène de la saturation a été introduit pour tenir compte de la saturation de la machine [7].

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation de l'équipement de l'électronique de puissance associé à la MADA [10, 11]. Nous présentons également une technique de commande de puissance délivrée par la machine basée sur le contrôle des courants rotoriques. Une gestion de l'interaction du rotor de la machine avec le réseau a été détaillée [8].

Dans le quatrième chapitre, nous étudions l'impact du creux de tension sur la MADA et nous donnons une explication physique des phénomènes qui ont lieu. Ensuite, nous présentons un ensemble de réglementations imposées par les opérateurs du réseau électrique concernant l'exploitation des éoliennes [24]. Des systèmes de protection [18, 19, 22, 28, 30] ont été proposés par la suite pour satisfaire les exigences des 'GRID-CODES'. Nous terminons ce chapitre avec une comparaison avec le générateur à vitesse fixe [6, 7].

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES AEROGENERATEURS

I.1. Introduction

L'énergie éolienne connaît ces dernier temps un essor sans précédent du notamment au premier choc pétrolier et au réchauffement climatique. Dans le même ordre d'idée, ce type d'énergie permet aussi de réduire les émissions des gazes à effet de serre.

Dans ce chapitre nous donnons un aperçu sur l'énergie éolienne et ses différentes structures. Nous présentons dans ce premier chapitre le principe de fonctionnement d'un aérogénérateur et les différents composants d'un système éolien. Ensuite, nous introduisons les différentes structures des aérogénérateurs et nous donnons pour chacune d'elles les éléments de comparaisons en citons les principaux avantages et inconvénients. Nous terminons ce chapitre par la description de l'impact de l'énergie éolienne sur les réseaux électriques.

I.2. Energie éolienne, structures et fonctionnement

I.2.1. Principe de fonctionnement

Un système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes:

- Première étape : au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.
- Deuxième étape : Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

I.2.2. Types d'éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement par les moyens de captage d'énergie du vent. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical (Figure I-1) ou à axe horizontal (Figure I-2) [1].



Figure I-1: Eolienne à axe vertical [1] Figure I-2: Eolienne à axe horizontal [1]

I.2.2.1. *Les éoliennes à axe vertical*

Connus aussi sous le nom de ‘SAVONIOUS’ elles ont une forme similaire à un cylindre creux qui utilise le principe de trainée différentielle utilisée dans les anémomètres, elles offrent l’avantage de la simplicité de construction et à l’accès au générateur.

Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit :

➤ Avantages

- ✓ La conception verticale offre l’avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- ✓ Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- ✓ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d’entretien.

➤ Inconvénient

- ✓ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal (coefficient de puissance réduit).
- ✓ La conception d’une éolienne verticale impose qu’elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- ✓ Leur implantation au sol exige l’utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc elles occupent une surface plus importante que les éoliennes horizontales.

I.2.2.2. *Les éoliennes à axe horizontale*

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d’avion. Dans ce cas, la portance n’est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d’électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit :

➤ Avantages

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

➤ Inconvénient

- ✓ Coût de construction très élevé.

- ✓ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
- ✓ Opérations de maintenance plus délicates.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance, destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [1].

I.3. Composants de l'éolienne

La figure I-3 illustre les composants essentiels d'une éolienne [1].

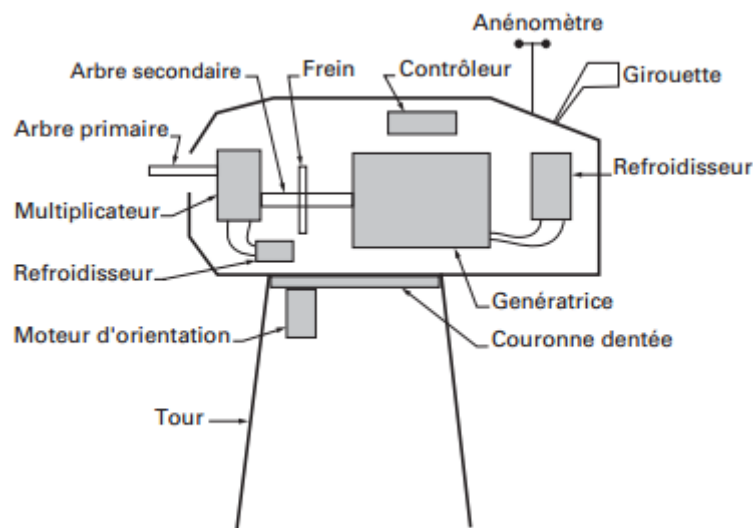


Figure I-3: Composants d'une éolienne [1]

Une éolienne est composée de :

- Une nacelle qui contient la génératrice ainsi que l'équipement de commande.
- Une tour qui maintient la nacelle.
- Des pales, généralement 3.

I.4. Différentes configurations des générateurs éoliens

A la base on peut utiliser n'importe quel type de machines électriques classique caractérisée par sa réversibilité. Mais des choix technico-économiques et des critères de robustesse s'imposent. On distingue deux grandes familles de générateurs éoliens :

I.4.1. Générateurs à vitesse fixe

Se sont généralement des machines asynchrones à cage qui sont directement connectées au réseau. Dans ce cas la machine fonctionne en hyper synchrone et débite directement sa puissance dans le réseau de distribution Fig.I-4, ce montage ne nécessite pas de dispositifs d'électronique de puissance, cependant il faut prévoir des condensateurs qui servent à fournir de l'énergie réactive pour l'auto-amorçage du générateur avant de l'accrocher au réseau.

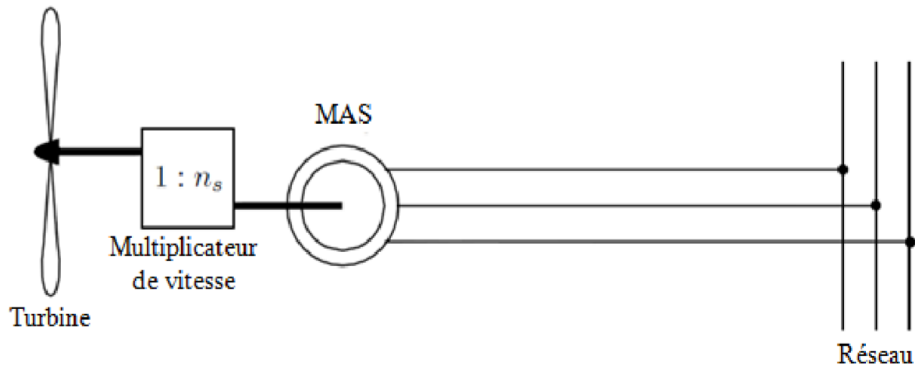


Figure I-4 : Générateur asynchrone à vitesse fixe [3]

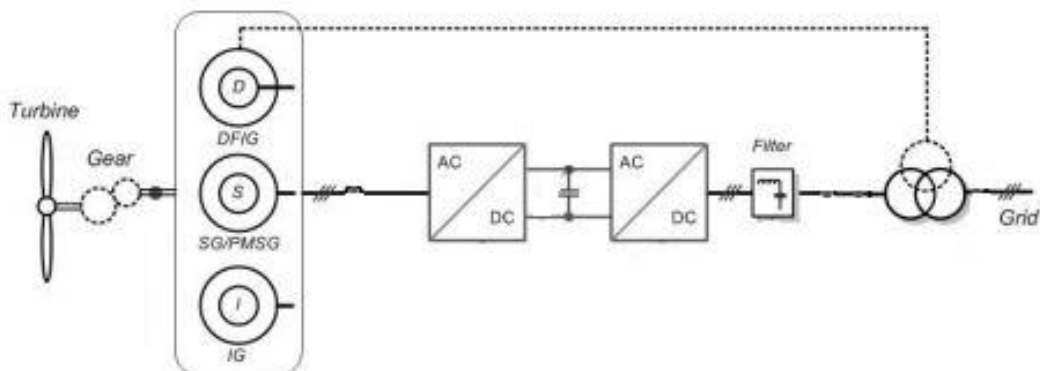
Ce montage emploie une machine asynchrone à cage qui est connue pour sa robustesse, et son cout de l'installation moins cher par rapport aux autres aérogénérateurs, vu qu'il n'y a pas de convertisseurs statiques.

Mais, le contrôle de puissance est désormais impossible car le profil du vent de nature fluctuante et imprévisible cause des fluctuations au niveau de la puissance extraite, et crée des efforts supplémentaires sur l'engrenage de transmission.

L'installation d'une batterie de condensateur occupe un volume supplémentaire.

I.4.2. Générateurs à vitesse variable

Pour cette configuration nous avons le choix entre les machines synchrones ou bien asynchrones Fig.I-5. En effet le contrôle de fréquence offre la possibilité de fonctionner dans une large gamme de vitesse et participant ainsi à réduire la taille de l'engrenage.



FigureI-5: Générateurs à vitesse variable [3]

I.4.2.1. Variation de vitesse par dissipation rotorique

L'installation d'un pont redresseur commandé suivi d'une résistance offre la possibilité de contrôler la vitesse de la génératrice dans un intervalle de +/- 10% de la vitesse de synchronisme Fig.1-6.

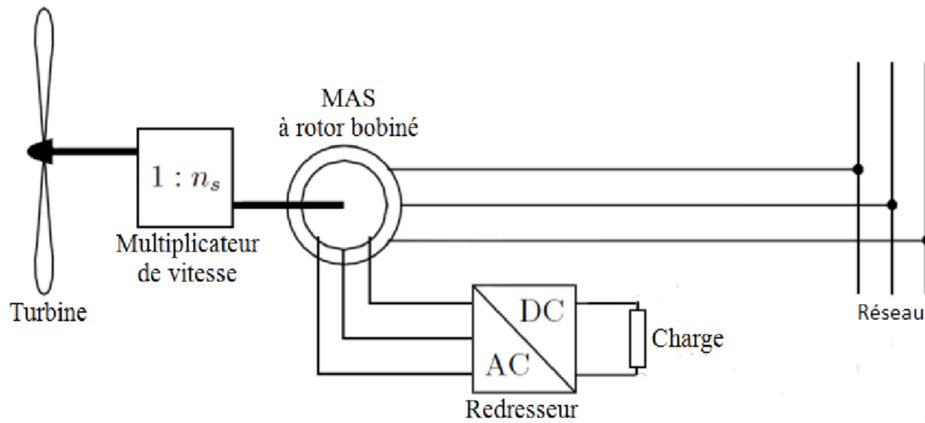


Figure I-6 : Variation de vitesse par dissipation rotorique [3]

Cette structure a l'avantage de contrôler la puissance extraite du vent, en utilisant un simple convertisseur d'électronique de puissance faiblement dimensionné ($g \cdot P_n$), avec une simplicité dans la commande. Le contrôle de puissance n'est pas optimisé, en effet il est impossible de contrôler l'énergie réactive échangée avec le réseau. L'intervalle de fonctionnement de la machine qui est de +/- 10% de la vitesse de synchronisme nécessite l'installation d'un engrenage à plusieurs rapports et nécessite un entretien plus fréquent.

1.4.2.2. Variation de vitesse par pilotage au stator

Pour ce type de configurations, nous avons le choix entre les machines synchrones et asynchrones. Un convertisseur d'électronique de puissance dimensionné pour au moins 100% de la puissance nominale de la machine est connecté au niveau du stator de la génératrice offrant ainsi un contrôle de fréquence statorique et une plage de variation de vitesse de 100% Fig.1-7.

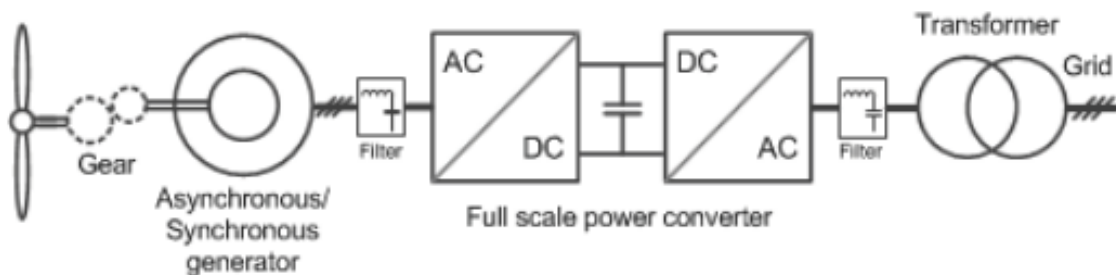


Figure I-7: Variation de vitesse par pilotage au stator [3]

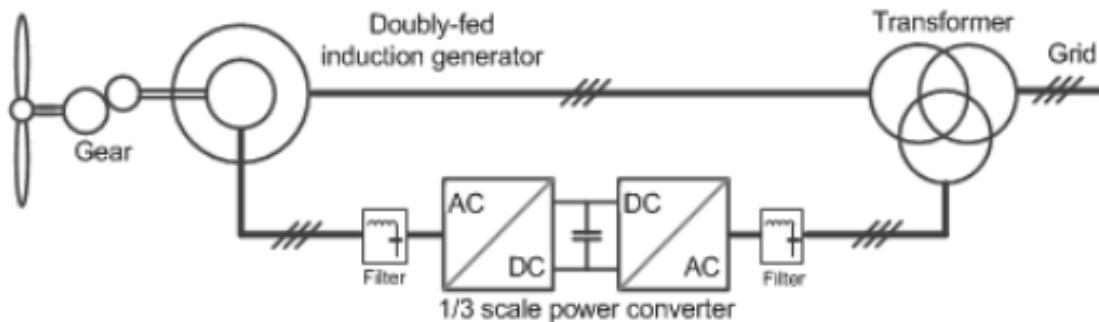
Le convertisseur coté machine, contrôle la fréquence statorique et offre une large plage de variation de vitesse, qui permet d'éliminer complètement l'utilisation de l'engrenage. Le convertisseur coté réseau permet de délivrer une puissance d'une qualité meilleure que les autres configurations.

Pour diminuer la taille du multiplicateur voir l'enlever complètement, il est nécessaire d'employer des machines qui fonctionnent à basse vitesse, c'est à dire des machines à un nombre de paires de pôles élevés, ces machines sont plus coûteuses et volumineuses par rapport à d'autres machines de même puissance.

Les convertisseurs statiques dimensionnés pour plus de 100% de la puissance nominale de la machine, ont un cout élevé et occupent une place supplémentaire. Pour les grandes puissances il y a nécessité d'assembler des modules en série ou bien en parallèle, ce qui rend l'installation plus complexe.

I.4.2.3. Variation de vitesse par double alimentation stator-rotor

Pour ce type de configurations nous utilisons les machines asynchrone à double alimentation, le stator est directement lié au réseau, et le rotor est connecté au réseau via un convertisseur statique Fig.I-8



FigureI-8 : Variation de vitesse par double alimentation stator-rotor [3]

Le convertisseur étant dimensionné au maximum pour 30% de la puissance de la machine, permet à la fois de contrôler la vitesse et les puissances. La plage de variation de vitesse est de l'ordre $\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisme.

Cette configuration ne peut pas alimenter un site isolé et elle doit impérativement être connectée au réseau et par conséquent elle est très sensible aux perturbations qui peuvent avoir lieu sur le réseau.

Une maintenance de contacts glissants et du multiplicateur de vitesse est nécessaire.

Cette structure fait l'objet de notre travail et elle sera étudiée profondément dans les autres chapitres de ce mémoire.

I.5. Impact de l'énergie éolienne sur le réseau

Nous remarquons des conséquences de l'exploitation de l'énergie éolienne sur le réseau de distribution, en fait la nature de l'énergie du vent qui est fluctuante et imprévisible a un impact direct sur la qualité de l'énergie fournie par ces aérogénérateurs ces derniers peuvent être la source de plusieurs perturbations sur le réseau et peuvent provoquer une pollution harmonique considérable.

Il y'a un autre problème que l'on rencontre le plus souvent avec les générateurs à cage c'est celui de l'accrochage au réseau des pics de courant peuvent apparaitre au niveau de la machine lors de la connexion de ces générateurs et qui peuvent causer des chutes de tensions dans les nœuds voisins Fig. I-9 [6, 25]. Ce problème n'existe pas pour les générateurs équipés de convertisseurs d'électronique de puissance qui utilisent généralement des lois de commande appropriées pour éviter ce genre de problème.

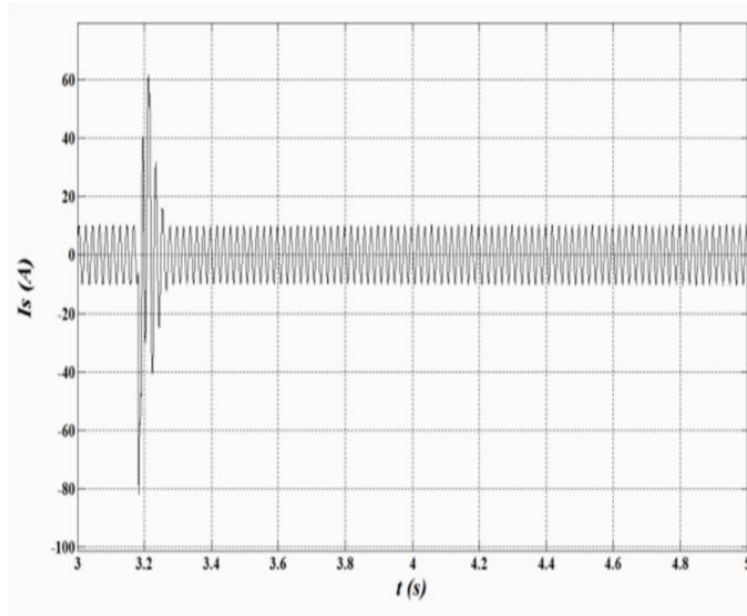


Figure I-9: pic de courant lors de l'accrochage d'un générateur asynchrone à vitesse fixe sur le réseau

Il y'a également un autre souci avec les aérogénérateurs c'est durant les perturbations du réseau notamment le creux de tension où les générateurs subissent des transitoires très violents qui peuvent endommager la partie électrique (machine + convertisseurs) et la partie mécanique.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des composants et types d'un système éolien, qui nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale et nous a donné une idée sur les techniques de contrôle des différentes structures. Dans le reste de ce mémoire nous étudions la MADA où nous présentons les différentes techniques de commande ainsi qu'une analyse complète de la MADA durant un creux de tension.

CHAPITRE II : MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

II.1. Introduction

Un modèle mathématique d'une machine électrique permet de prédire le comportement de celle-ci avec des conditions données. Il permet d'approcher la réponse du système en essayant de traduire de la façon la plus fiable possible les phénomènes physiques tel que le flux magnétique et les courants.

L'élaboration d'un modèle mathématique s'avère nécessaire lors des phases d'étude du comportement de la machine. Il se traduit par le dimensionnement des dispositifs de contrôle, de la synthèse des lois de commande et de calcul des paramètres des régulateurs.

Nous présentons dans ce chapitre le principe et les différents modes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière est considérée comme un système complexe, non linéaire et fortement couplé, dans ce chapitre nous établissons deux modèles pour la machine, le premier est issu de l'hypothèse de la linéarité du flux, et l'autre tient compte de la saturation du circuit magnétique de la machine.

II.2. Description et modes de fonctionnement de la MADA

II.2.1. Description de la MADA

Une machine asynchrone à rotor bobiné peut être alimentée par deux sources distinctes branchées respectivement au stator et au rotor. Cette machine, appelée « machine asynchrone à double alimentation », elle est utilisée dans des applications requérant une vitesse variable. Elle peut être utilisée comme moteur pour, par exemple, entraîner des pompes, ou bien dans les éoliennes comme génératrice à vitesse variable [2].

La MADA est constituée de deux armatures fig.II-1, l'une fixe (stator) et l'autre mobile (rotor), le stator est constitué d'un bobinage triphasé qui est directement branché au réseau, et le rotor, contrairement aux machines asynchrones standards, il est constitué lui aussi d'un bobinage triphasé qui est branché au réseau à travers un convertisseur d'électronique de puissance.

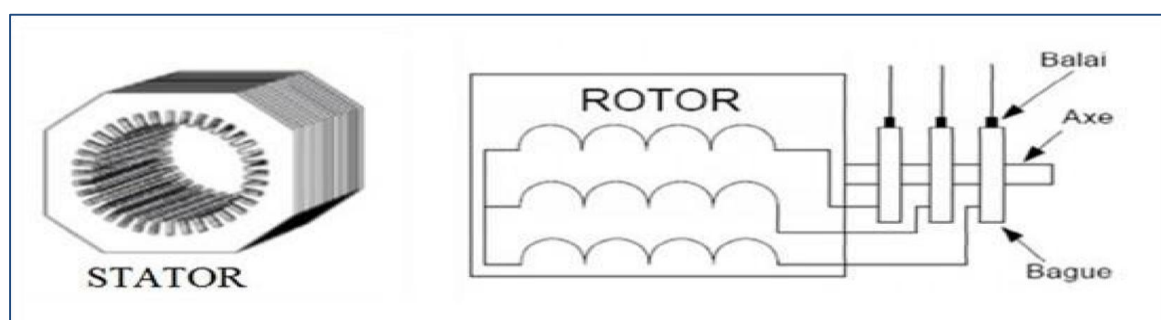


Figure II-1: Constituants d'une machine asynchrone à double alimentation [3]

L'avantage de la MADA est qu'elle peut fonctionner dans un intervalle de $\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisme.

II.2.2. Modes de fonctionnement de la MADA :

Nous pouvons définir quatre quadrants de fonctionnement de la MADA: moteur, générateur en hypo et hyper synchrone. Si la machine entraine une charge elle absorbe de l'énergie du réseau via son stator fonctionnant ainsi en mode moteur, et si elle reçoit un couple mécanique dans le même sens de rotation les pôles magnétiques au niveau du rotor auront tendance à être en avance par rapport aux pôles statoriques, par conséquent, la machine est en mode génératrice et l'énergie est envoyée au réseau via le stator.

L'échange d'énergie au niveau du rotor dépend essentiellement de la vitesse de rotation Fig.II-2, nous détaillons dans les paragraphes suivants chacun des quatre modes de fonctionnement [2, 3,5].

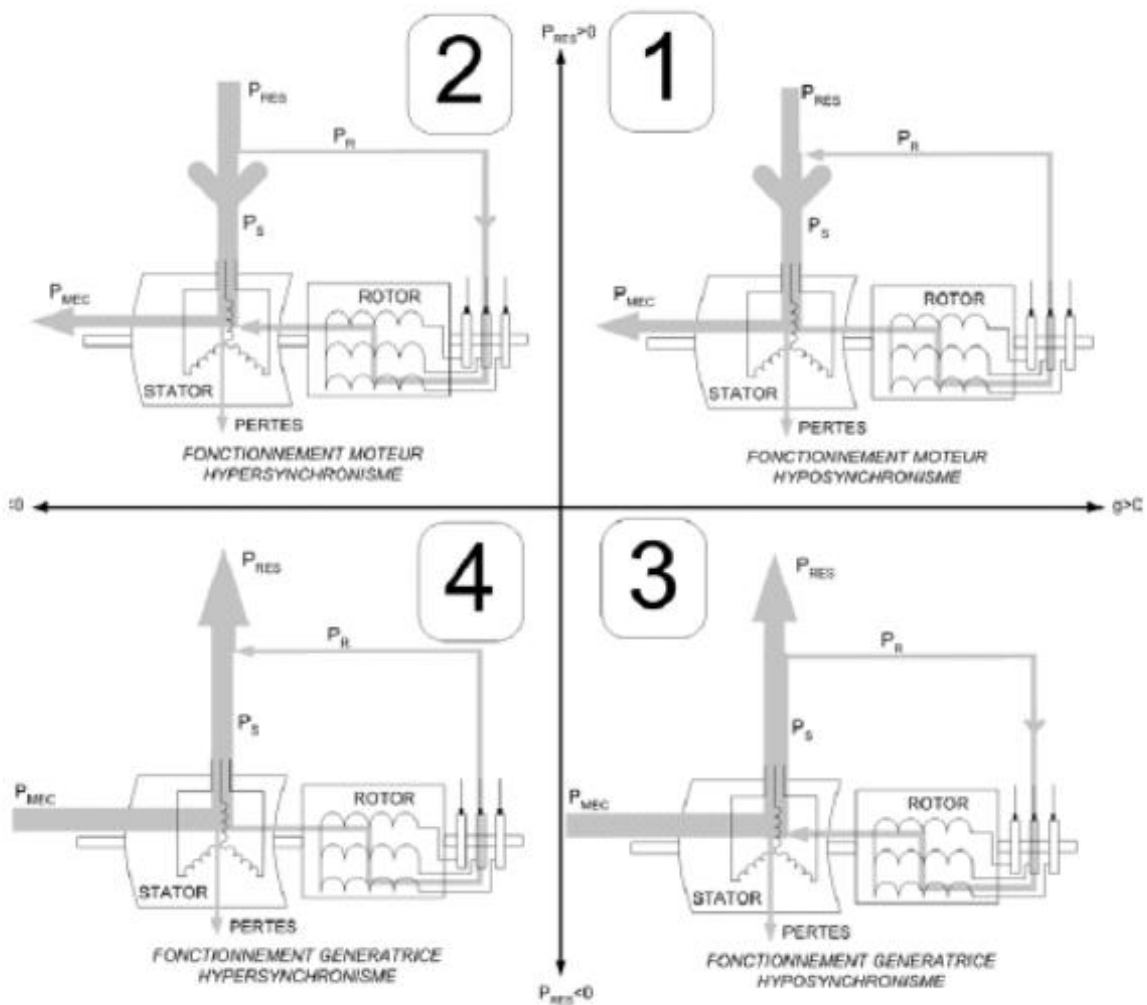


Figure II-2: Modes de fonctionnement de la MADA [2]

II.2.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

Pour ce mode de fonctionnement Fig.II.2 (1), la MADA est utilisée comme moteur pour une vitesse au-dessous de synchronisme et absorbe de l'énergie du réseau via son stator, la puissance de

glissement est récupérée par le biais du convertisseur statique au niveau du rotor et réinjectée à nouveau dans le réseau.

II.2.2.2. *Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone*

Pour ce mode de fonctionnement Fig.II.2 (2), la MADA est utilisée comme moteur pour une vitesse au-dessus de synchronisme et absorbe de l'énergie du réseau via le stator et le rotor en même temps.

II.2.2.3. *Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone*

Pour ce mode de fonctionnement Fig.II.2 (3), la MADA est utilisée comme génératrice pour une vitesse au-dessous de synchronisme et fournit de l'énergie au réseau via son stator, pour cette configuration le flux de puissance rotorique est entrant, i.e. : il y a consommation de l'énergie au niveau du rotor.

II.2.2.4. *Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone*

Pour ce mode de fonctionnement Fig.II.2 (4), la MADA est utilisée comme génératrice pour une vitesse au-dessous de synchronisme et fournit de l'énergie au réseau via son stator, pour cette configuration le flux de puissance rotorique est sortant, i.e. : il y a génération de l'énergie au niveau du rotor.

La MADA offre l'avantage de fonctionner comme une génératrice à vitesse variable pour une large gamme de variation de vitesse, c'est le mode de fonctionnement n°4 (mode générateur hyper synchrone) qui est le plus répandu pour les aérogénérateurs [2].

II.3. Modèle de la MADA dans le plan ABC

Dans cette partie nous élaborons un modèle de la machine asynchrone dans le plan ABC. Nous utilisons la loi de Faraday pour exprimer l'interaction entre les trois bobines statoriques et les trois bobines rotoriques. Nous présentons une modélisation d'une machine asynchrone idéalisée à une paire de pôles ($p=1$) [13].

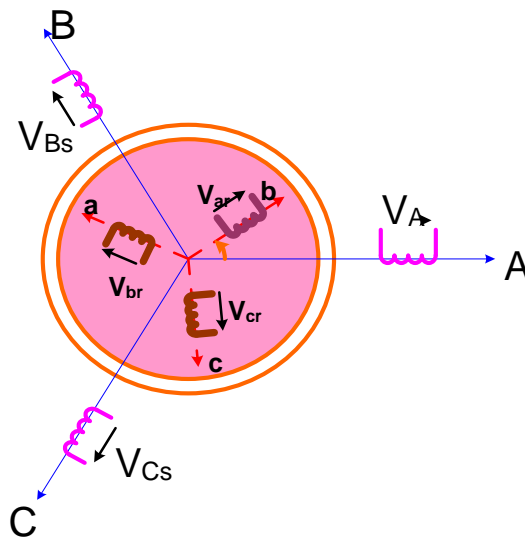


Figure II-3: Représentation schématique de la machine asynchrone

II.3.1. Hypothèses simplificatrices

Afin de faciliter la modélisation de la MADA, nous donnons quelques hypothèses simplificatrices [3,5] :

- ✓ La machine est symétrique et les bobines sont décalées de 120°.
- ✓ Les résistances des enroulements sont constantes (ne varient pas avec la température).
- ✓ La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- ✓ L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoches négligeable.
- ✓ Nous ne considérons que le premier harmonique d'espace.
- ✓ L'effet de peau et l'effet pelliculaire sont négligeables.

II.3.2. Equations électriques de la machine :

Les équations électriques s'expriment :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$V_{s,r}$: Les tensions simples statorique et rotorique.

$I_{s,r}$: Les courants de phase statorique rotorique.

$\varphi_{s,r}$: Les flux statorique et rotorique respectivement.

$R_{s,r}$: Les résistances par phase statorique et rotorique.

II.3.3. Equations des flux :

De la même manière on peut écrire les équations des flux sous la forme :

$$\begin{cases} \varphi_s = [l_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ \varphi_r = [l_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II. 2})$$

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant (II.2) dans (II.1), on obtient le système d'équations ci-dessous, qui représente le modèle de la machine asynchrone dans le repère naturel (ABC):

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{As} \\ V_{Bs} \\ V_{Cs} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{As} \\ I_{Bs} \\ I_{Cs} \end{bmatrix}, \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{As} \\ \varphi_{Bs} \\ \varphi_{Cs} \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}, \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec :

$L_{s,r}$: Les inductances propres statoriques et rotoriques.

$M_{s,r}$: Les mutuelles entre les bobines statoriques respectivement rotoriques.

II.3.4. Equation mécanique :

L'expression du couple électromagnétique peut être déduite à partir de l'expression de la Co-énergie:

$$\Gamma_e = \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \theta}$$

$$\Gamma_e = \frac{1}{2} \cdot p \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{d\theta} L(\theta) \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}$$

Sachant que les matrices inductances $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont à termes constants, l'expression du couple devient comme suit :

$$\Gamma_e = \frac{1}{2} \cdot p \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{d\theta} M_{sr}(\theta) \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

D'autre part, l'équation du mouvement est donnée par :

$$J_s \cdot \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_e - \Gamma_r - f_r \Omega \quad (II.5)$$

Ces équations constituent le modèle mathématique de la machine asynchrone dans le plan ABC, nous avons obtenu un système d'équations d'ordre élevé et très complexes, de plus, les équations différentielles obtenues sont à coefficients variables (en fonction de l'angle θ) ce qui rend la résolution de ce système très complexe.

Il existe des transformations mathématiques qui permettent de réduire l'ordre du système et simplifient la résolution, en passant du plan ABC vers le plan α, β (Concordia) et le plan d, q (la transformation de R.H.Park).

II.4. Modèle linéaire de la MADA dans le plan d, q

II.4.1. La transformation de R.H.Park

Pour simplifier la résolution du système d'équations différentielle a coefficients variables, nous optons pour la transformée de R.H.Park. Cette transformation permet de passer du système triphasé alternatif dans le plan (ABC) vers un système diphasé (d, q) [3, 5, 10, 13].

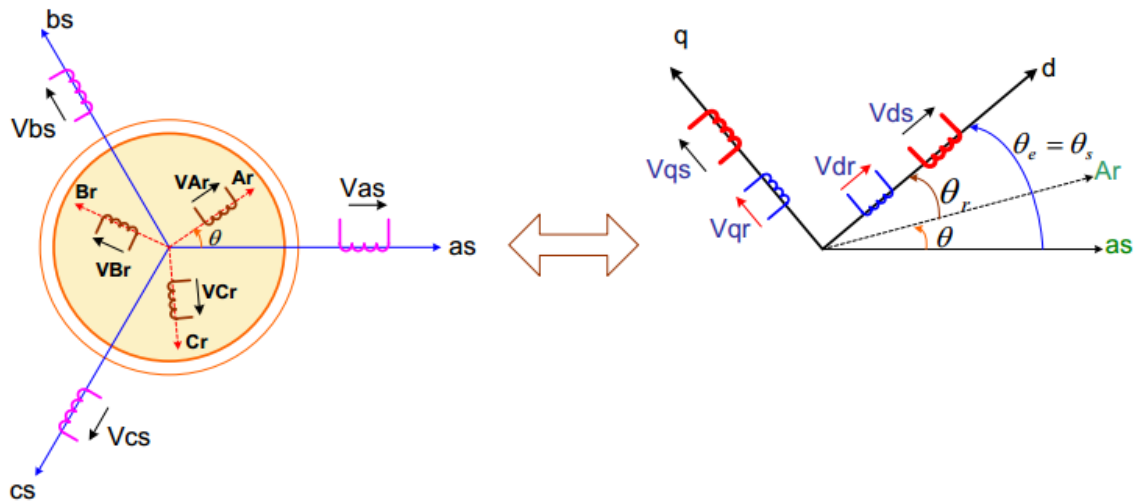


Figure II-4: Passage du plan ABC vers d, q

La matrice de transformation est définie par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix},$$

$$P^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

II.4.2. Equations électriques de la MADA dans le repère d, q

La transformation des variables réelles statoriques et rotoriques de la machine consiste à appliquer la matrice de Park $P(\theta)$ aux vecteurs des variables tensions $V_{s,r}$, courant $I_{s,r}$ et flux $\varphi_{s,r}$ pour obtenir leurs composantes relatives correspondantes $V_{d,q(r,s)}$, $I_{d,q(r,s)}$ et $\varphi_{d,q(r,s)}$ respectivement, suivant les équations [5, 10, 13] :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta_e)][V_{s,abc}] \\ [I_{s,dq}] = [P(\theta_e)][I_{s,abc}] \\ [\varphi_{s,dq}] = [P(\theta_e)][\varphi_{s,abc}] \end{cases} ; \begin{cases} [V_{r,dq}] = [P(\theta_e - \theta)][V_{r,abc}] \\ [I_{r,dq}] = [P(\theta_e - \theta)][I_{r,abc}] \\ [\varphi_{r,dq}] = [P(\theta_e - \theta)][\varphi_{r,abc}] \end{cases}$$

Les équations électriques deviennent:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_e \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_e \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 6})$$

De même les équations de flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II. 7})$$

En remplaçant (II.7) dans (II.6), on peut écrire le modèle sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p \cdot L_s & -\omega_e \cdot L_s & p \cdot M & -\omega_e \cdot M \\ \omega_e \cdot L_s & R_s + p \cdot L_s & \omega_e \cdot M & p \cdot M \\ p \cdot M & -(\omega_e - \omega) \cdot M & R_r + p \cdot L_r & -(\omega_e - \omega) \cdot L_r \\ (\omega_e - \omega) \cdot M & p \cdot M & (\omega_e - \omega) \cdot L_r & R_r + p \cdot L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 8})$$

II.4.3. Equation du couple électromagnétique :

En effectuant le bilan de puissance consommée par la machine nous obtenons :

$$P_e = (V_{sa} \cdot I_{sa} + V_{sb} \cdot I_{sb} + V_{sc} \cdot I_{sc}) + (V_{ra} \cdot I_{ra} + V_{rb} \cdot I_{rb} + V_{rc} \cdot I_{rc})$$

Donc :

$$P_e = (V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs}) + (V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr})$$

En remplaçant les tensions par leurs expressions, on trouve :

$$P_e = \omega_s (\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) + (\omega_s - \omega) (\varphi_{dr} \cdot I_{qr} - \varphi_{qr} \cdot I_{dr})$$

En les flux par leurs expressions (II.7) :

$$\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds} = \varphi_{qr} \cdot I_{dr} - \varphi_{dr} \cdot I_{qr}$$

D'autre part :

$$\Gamma_e = \frac{P_e}{\Omega}$$

D'où :

$$\Gamma_e = p(\varphi_{dr} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (\text{II. 9})$$

En remplaçant les flux par les courants dans (II.9), on trouve :

$$\Gamma_e = p \cdot M(I_{dr} \cdot I_{qr} - I_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (\text{II. 10})$$

II.4.4. Choix de référentiel

Il est intéressant d'écrire les équations dans un référentiel lié soit à l'une des armatures, soit au champ tournant, selon les objectifs de l'application.

Dans chacun de ces référentiels, les équations de la machine sont plus simples que dans le référentiel quelconque. Il existe pratiquement trois possibilités :

II.4.4.1. Référentielle lié au stator :

Il se traduit par les relations :

$$\omega_e = 0 \quad ; \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = 0 \quad ; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = -\omega$$

Donc on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p \cdot L_s & 0 & p \cdot M & 0 \\ 0 & R_s + p \cdot L_s & 0 & p \cdot M \\ p \cdot M & \omega \cdot M & R_r + p \cdot L_r & \omega \cdot L_r \\ -\omega \cdot M & p \cdot M & -\omega \cdot L_r & R_r + p \cdot L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 11})$$

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé dans l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation.

II.4.4.2. Référentiel lié au rotor :

Il se traduit par les relations suivantes :

$$\omega_e = \omega \quad ; \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad ; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = 0 ; \quad \theta_s = \theta_r + \theta$$

Donc on aura le système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p.L_s & -\omega.L_s & p.M & -\omega.M \\ \omega.L_s & R_s + p.L_s & \omega.M & p.M \\ p.M & 0 & R_r + p.L_r & 0 \\ 0 & p.M & 0 & R_r + p.L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 12})$$

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

II.4.4.3. Référentiel lié au champ tournant

Il se traduit par les relations suivantes :

$$\omega_e = \omega_s \quad ; \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad ; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r - \omega = g\omega_s$$

Les équations électriques de II.6 s'écrivent:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - g\omega_s \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + g\omega_s \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 13})$$

Les équations sous forme matricielle s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p.L_s & -\omega_s.L_s & p.M & -\omega_s.M \\ \omega_s.L_s & R_s + p.L_s & \omega_s.M & p.M \\ p.M & -g\omega_s.M & R_r + p.L_r & -g\omega_s.L_r \\ g\omega_s.M & p.M & g\omega_s.L_r & R_r + p.L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 14})$$

Ce référentiel est utilisé généralement pour l'étude des moteurs alimentés par des variateurs de vitesse, il offre l'avantage d'avoir des grandeurs de courants, flux et tensions continu en régime

permanant d'où la facilité pour la commande et la synthèse des régulateurs. Nous utiliserons ce référentiel dans la suite de ce mémoire.

II.4.5. Validation du modèle linéaire :

Afin de valider le modèle élaboré en II.4.2, nous avons simulé le démarrage de la machine asynchrone à partir d'un réseau triphasé de tension simple de 127V.

Les résultats sont donnés pour un démarrage à vide avec l'application d'un couple résistant de 20N.m à $t=1.2s$.

L'étude a été faite sous l'environnement Matlab/Simulink, les résultats de simulation sont présentés sur les figures suivantes :

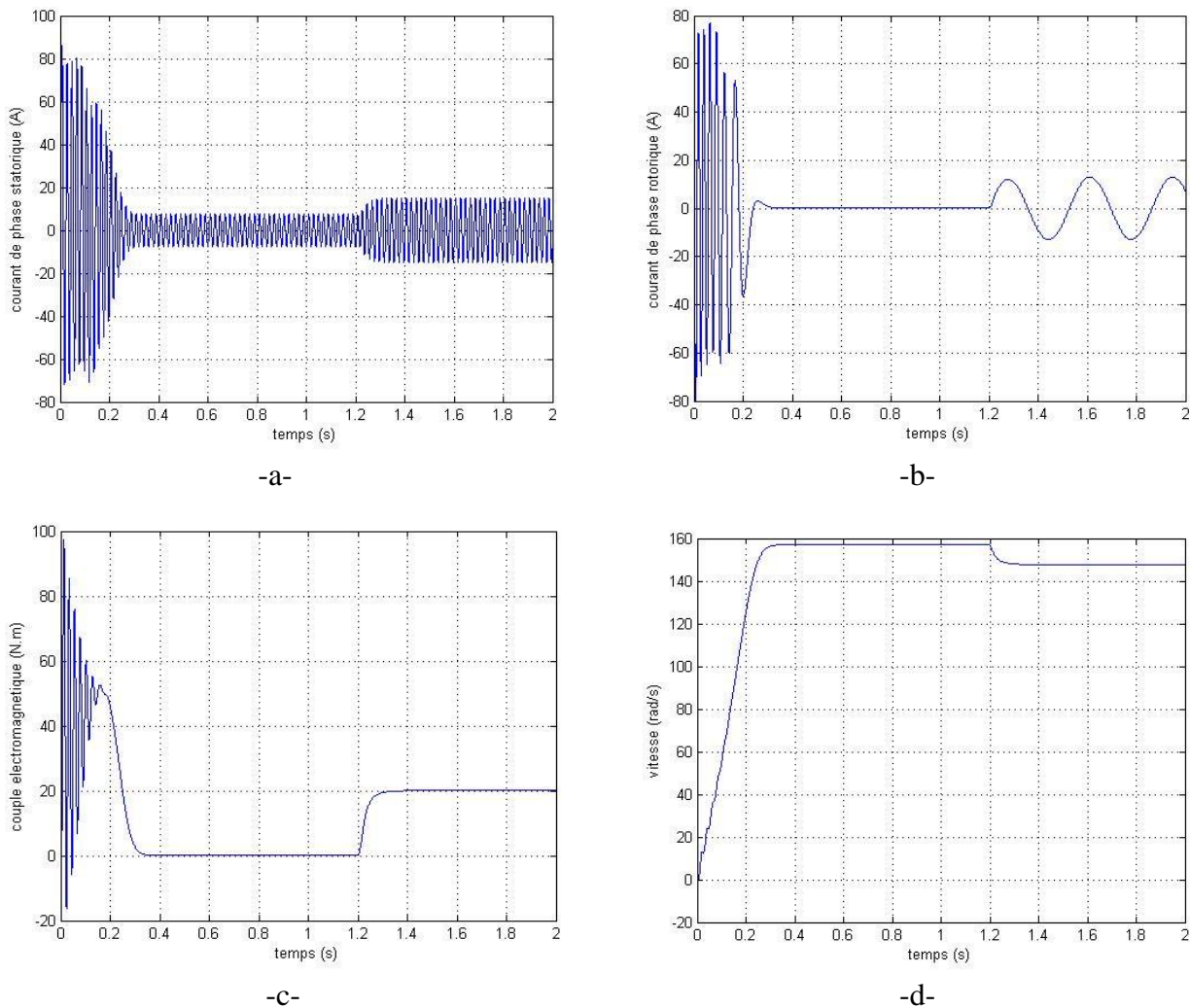


Figure II-5: Résultats de simulation de démarrage de la machine asynchrone
 (a) : courant de phase statorique, (b) : courant de phase rotorique
 (c) : couple électromagnétique, (d) : la vitesse

➤ **Interprétations des résultats**

- Lors du démarrage nous constatons des pics de courant important au niveau du stator et au rotor (Fig.II-5-a et Fig.II-5-b) qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire.

- Le couple électromagnétique présente des oscillations durant le démarrage de la machine (Fig.II-5-c) et s'atténue au fur et à mesure que la vitesse s'approche du synchronisme et se stabilise à une valeur voisine de zéro. à l'application d'un couple résistant le couple électromagnétique augmente jusqu'à avoir une valeur qui compense le couple résistant.
- La figure II-5-d représente l'évolution de la vitesse en fonction du temps, en régime transitoire la vitesse s'accroît linéairement jusqu'à atteindre une valeur voisine de la vitesse de synchronisme. A l'application d'un couple résistant à $t=1.2s$ la vitesse diminue, c'est l'un des principes fondamentaux du fonctionnement de la machine asynchrone.
- Les courants statorique et rotorique vont prendre de l'ampleur des qu'il y a l'application d'un couple résistant.

II.5. Modèle saturé de la MADA dans le plan d, q

L'étude du comportement en régime dynamique de la MADA est une tâche difficile et qui nécessite l'élaboration d'un modèle précis, afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés. Nous nous intéressons dans ce qui suit à la modélisation de la machine asynchrone. La non-linéarité du circuit magnétique sera prise en considération afin d'obtenir le plus de concordance entre le comportement réel de la machine ainsi celui donné par le modèle.

II.5.1. Développement spatial de flux

Les deux composantes des vecteurs spatiaux flux et courant sont définies suivant les deux axes d et q Fig.II-6. Le flux suivant chaque axe et à travers chaque bobine est la somme d'un flux mutuel et d'un flux de fuites, et on admet que cette dernière composante est indépendante de la saturation [6, 25].

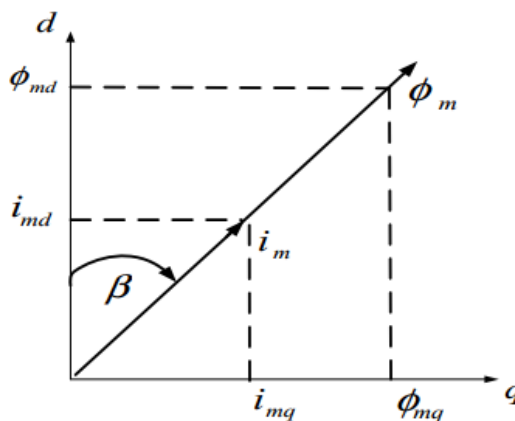


Figure II-6: Représentation des vecteurs courants et flux magnétisants [6]

$$\begin{cases} \overline{\Psi}_s = \overline{\phi}_s + \overline{\phi}_m \\ \overline{\Psi}_r = \overline{\phi}_r + \overline{\phi}_m \end{cases} \quad (\text{II. 15})$$

Le flux et le courant magnétisant sont donnés par :

$$\begin{cases} \overline{\phi}_s = M_{st} \cdot \overline{I}_m = \phi_{md} + j\phi_{mq} \\ \overline{I}_m = \overline{I}_s + \overline{I}_r = (i_{ds} + j \cdot i_{qs}) + (i_{dr} + j \cdot i_{qr}) = i_{md} + j \cdot i_{mq} \end{cases} \quad (\text{II. 16})$$

Avec :

- $\overline{\phi}_s, \overline{\phi}_r$: Respectivement les vecteurs flux de fuite statorique et rotorique.
- ϕ_m, I_m : Respectivement le vecteur de flux et le courant magnétisant.

Les équations électriques s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + l_s \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{d\phi_{md}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + l_s \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{d\phi_{mq}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + l_r \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{d\phi_{md}}{dt} - g\omega_s \phi_{qr} \\ v_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + l_r \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + \frac{d\phi_{mq}}{dt} + g\omega_s \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 17})$$

I_s, I_r : Représentent les inductances de fuites respectivement au stator et au rotor qui seront considérées comme constantes

Pour déterminer la quantité $\frac{d\phi_{md}}{dt}$, nous calculons la dérivée de flux par rapport au temps comme suite :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{md}}{dt} = \frac{d(\phi_m \cdot \cos(\beta))}{dt} = \frac{d\phi_m}{dt} \cdot \cos(\beta) - \phi_m \cdot \frac{d\beta}{dt} \cdot \sin(\beta) \\ \frac{d\phi_m}{dt} \cdot \cos(\beta) = \frac{d\phi_m}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt} \cdot \cos(\beta) = \frac{d\phi_m}{di_m} \cdot \cos(\beta) \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{i_{md}}{\cos(\beta)} \right) \\ \frac{d\phi_m}{dt} \cdot \cos(\beta) = \frac{d\phi_m}{di_m} \left[\frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \cdot \text{tg}(\beta) \frac{d\beta}{dt} \right] \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

L'équation 1 du système d'équation (II.18) s'écrit :

$$\frac{d\phi_{md}}{dt} = \frac{d\phi_m}{di_m} \cdot \frac{di_{md}}{dt} + \left[\frac{d\phi_m}{dt} \cdot i_{md} \cdot \text{tg}(\beta) - \phi_m \cdot \sin(\beta) \right] \cdot \frac{d\beta}{dt} \quad (\text{II. 19})$$

La dérivée $\frac{d\beta}{dt}$, s'exprime par :

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\arctg \left(\frac{i_{mq}}{i_{md}} \right) \right] = \frac{\cos\beta}{i_m} \left(\frac{di_{mq}}{dt} - \text{tg}(\beta) \cdot \frac{di_{md}}{dt} \right) \quad (\text{II. 20})$$

Donc l'équation peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{d\phi_{md}}{dt} = \left[\frac{d\phi_m}{di_m} + \sin(\beta)^2 \cdot \left(\frac{\phi_m}{i_m} - \frac{d\phi_m}{di_m} \right) \right] \cdot \frac{di_{md}}{dt} + \left[\left(\frac{d\phi_m}{di_m} - \frac{\phi_m}{dt} \right) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) \right] \cdot \frac{di_q}{dt} \quad (\text{II. 21})$$

$\frac{d\phi_{md}}{dt}$ est calculée de la même manière :

$$\frac{d\phi_{md}}{dt} = \left[\frac{d\phi_m}{di_m} + \cos(\beta)^2 \cdot \left(\frac{\phi_m}{i_m} - \frac{d\phi_m}{di_m} \right) \right] \cdot \frac{di_{mq}}{dt} + \left[\left(\frac{d\phi_m}{di_m} - \frac{\phi_m}{dt} \right) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) \right] \cdot \frac{di_{md}}{dt} \quad (\text{II. 22})$$

Tel que :

- $\frac{\phi_m}{i_m}$: Représente la mutuelle inductance statique M_{st}
- $\frac{d\phi_m}{di_m}$: Représente la mutuelle inductance dynamique M_{dy}

On pose :

$$\begin{cases} L_d = \frac{d\phi_m}{di_m} + \sin(\beta)^2 \cdot \left(\frac{\phi_m}{i_m} - \frac{d\phi_m}{di_m} \right) \\ L_q = \frac{d\phi_m}{di_m} + \cos(\beta)^2 \cdot \left(\frac{\phi_m}{i_m} - \frac{d\phi_m}{di_m} \right) \\ L_{dq} = \left(\frac{d\phi_m}{di_m} - \frac{\phi_m}{dt} \right) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

- L_d, L_q : sont des mutuelles inductances saturables suivant les deux axes
- L_{dq} : est la mutuelle inductance entre les deux axes, ou mutuelle d'inter saturation.

Avec ces nouvelles inductances le système d'équation devient :

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + l_s \frac{di_{ds}}{dt} + L_d \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} - \omega_s (l_s \cdot i_{qs} + M_{st} \cdot i_{mq}) \\ v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + l_s \frac{di_{qs}}{dt} + L_d \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} + \omega_s (l_s \cdot i_{ds} + M_{st} \cdot i_{md}) \\ v_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + l_r \frac{di_{dr}}{dt} + L_d \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} - g\omega_s (l_r \cdot i_{qr} + M_{st} \cdot i_{mq}) \\ v_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + l_r \frac{di_{qr}}{dt} + L_d \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} + g\omega_s (l_r \cdot i_{dr} + M_{st} \cdot i_{md}) \end{cases} \quad (\text{II. 24})$$

Pour notre cas, nous adoptons l'approximation suivante [25] :

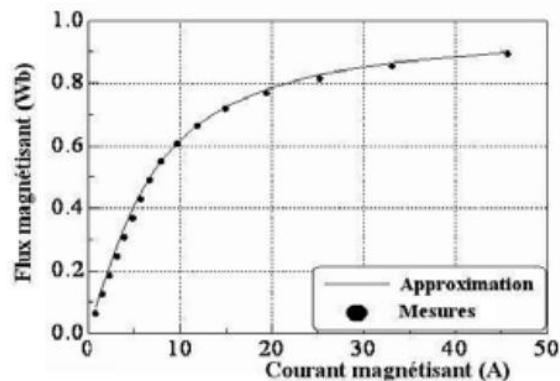


Figure II-7: Relevé expérimental de flux magnétisant en fonction du courant [25]

$$\Phi(I) = 0.59 \arctg(0.15 \cdot I_m)$$

Ce qui permet de déterminer les deux mutuelles :

$$M_{st} = \begin{cases} 0.078 \text{ si } I_m \leq 4.1 \text{ A} \\ 0.59 * \frac{\arctg(0.15 \cdot I_m)}{I_m} \text{ sinon} \end{cases} \quad (\text{II. 25})$$

$$M_{dy} = \frac{0.088}{1 + (0.15 \cdot I_m)^2} \quad (\text{II. 26})$$

Le modèle obtenue pour un repère lié au champ tournant :

$$\begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = [A] \begin{pmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 27})$$

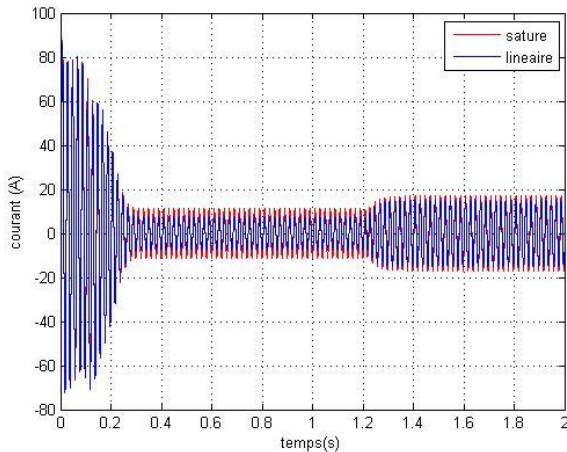
Avec :

$$A = \begin{pmatrix} r_s + pL_d & pL_{dq} - w_s l_s - w_s M_{st} & pL_d & pL_{dq} - w_s M_{st} \\ pL_{dq} + w_s l_s + w_s M_{st} & r_s + pL_q & pL_{dq} + w_s M_{st} & pL_q \\ PL_d & pL_{dq} - gw_s M_{st} & r_r + pL_r + pL_d & pL_{dq} - gw_s l_r - gw_s M_{st} \\ pL_{dq} + gw_s M_{st} & pL_q & pL_{dq} + gw_s l_r + gw_s M_{st} & r_r + pL_r + pL_q \end{pmatrix}$$

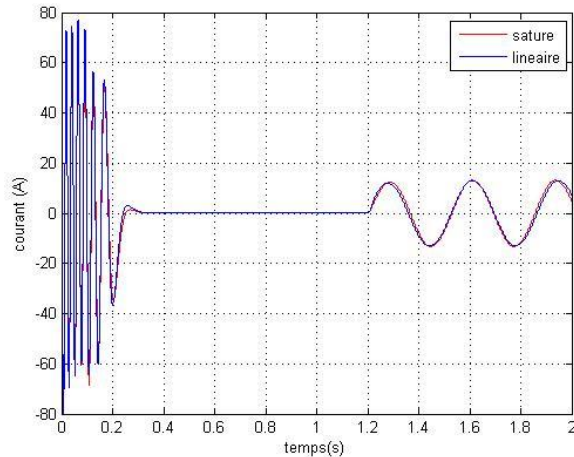
Validation du modèle :

Dans cette partie nous comparons sous les mêmes conditions que dans II.4.5 la réponse de la machine asynchrone pour un modèle linéaire et le modèle saturé élaboré ci-dessus.

Les résultats de simulations sont représentés sur les figures suivantes :



-a-



-b-

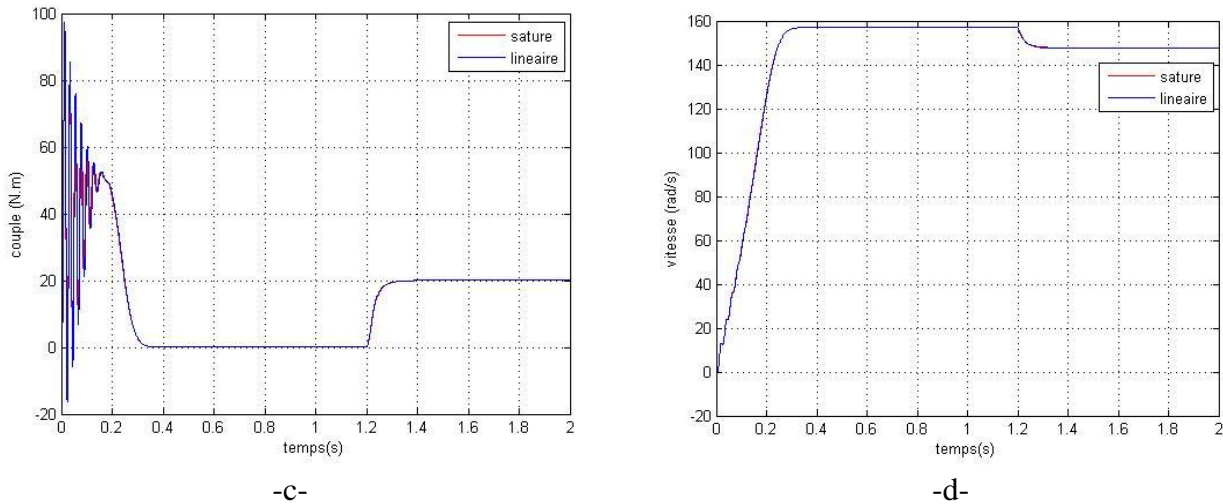


Figure II-8: Comparaison entre les résultats de simulation de démarrage de la MAS entre le modèle saturé et linéaire

(a) : courant de phase statorique, (b) : courant de phase rotorique
 (c) : couple électromagnétique, (d) : la vitesse

➤ **Interprétation des résultats :**

Le modèle saturé de la machine asynchrone donne des résultats quasi-similaires à ceux obtenus par le modèle linéaire. Quelques légères différences apparaissent au niveau du courant statorique qui est due au phénomène de la saturation magnétique.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, deux modèles ont été présentés, le premier sous l’hypothèse de linéarité qui servira à la synthèse de commande et de régulateurs, le second, est un modèle saturé utilisant la notion de saturation croisé, ce modèle est considéré comme plus précis que le premier.

CHAPITRE III : COMMANDE DE LA CHAINE DE CONVERSION

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons essentiellement à la modélisation des équipements d'électronique de puissance, le filtre et la commande de la chaîne de conversion.

Dans la première partie, nous présentons une technique de commande découplée de puissance active et réactive du convertisseur côté rotor. Cette technique a l'avantage d'être robuste et moins coûteuse. En effet, la commande des tensions rotoriques par le biais du convertisseur côté rotor a pour avantage de pouvoir contrôler directement les puissances statorique grâce au couplage électromagnétique entre les deux armatures de la machine.

La seconde partie de ce chapitre porte sur à l'étude de l'interaction du CCR avec le réseau, nous présentons la commande des courant du réseau et de la tension du bus continu de ce convertisseur.

III.2. La commande vectorielle de la MADA

Pour pouvoir contrôler l'énergie produite par la MADA nous avons proposé une technique de commande indépendante de puissance active et réactive, nous établissons une relation entre les puissances générés au niveau du stator et les grandeurs rotoriques (I_{rd}, I_{rq}) qui sont directement liés à l'onduleur côté rotor [10, 11, 12].

Les équations différentielles, décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

Le principe de cette commande est basé sur l'hypothèse de la stabilité du réseau de distribution en amplitude et en phase, ce qui conduit à avoir $V_{ds} = 0$, $V_{qs} = V_s$ et $\phi_{ds} = \phi_s$ et $\phi_{qs} = 0$.

Nous obtenons ainsi un flux statorique orienté suivant l'axe d, les équations (III.1) de la machine deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \phi_s \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

En négligeant la résistance des enroulements de l'armature statorique ce qui est une hypothèse acceptable pour des machines de forte puissance, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ 0 = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$\Gamma_e = p(\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (\text{III. 5})$$

Donc, en remplaçant les équations III.3 et III.4 dans III.5, l'expression du couple devient :

$$\Gamma_e = p \cdot \frac{V_s}{\omega_s} \cdot I_{qs} \quad (\text{III. 5})$$

Γ_e : Le couple électromagnétique.

p : Le nombre de paires de pôles.

III.2.1. Expressions des puissances active et réactive

Les puissances active et réactive statoriques dans le repère d, q s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 6})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

Les puissances actives P_s et réactive Q_s sont donc fonction des courant statorique I_{ds} et I_{qs} , qui s'expriment comme suit :

A partir de l'expression de flux statorique (III.4), on a :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III. 8})$$

En remplaçant les courants statoriques (III.8) dans les équations des puissances active et réactive (III.7), on trouve :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 9})$$

Il ressort de l'expression que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec un réseau électrique stable et une inductance magnétisante constante, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ imposée par le réseau [11,13].

III.2.2. Expressions des tensions

En remplaçant le système d'équation (III.8) dans l'expression de flux rotorique (III.4), nous obtenons :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III. 10})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (III.3), on trouve:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \cdot \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

A partir des systèmes d'équations (III.9) et (III.11), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous.

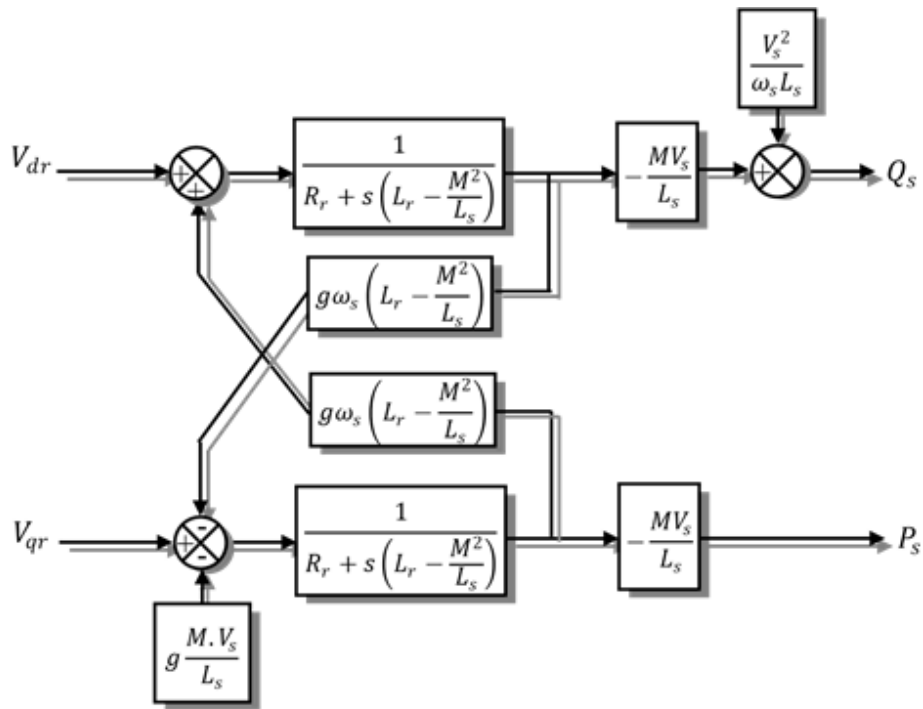


Figure III-1: Schéma représentant le système des puissances

Nous obtenons un système de puissance active et réactive en fonction des tensions rotoriques, nous remarquons l'existence d'un terme de couplage entre les deux grandeurs qu'on souhaite contrôler traduit par $g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})$. Ce terme peut être négligé pour les faibles valeurs de glissement, cependant, pour les variations de vitesse trop importante il faut prévoir une commande qui tient compte de ce couplage.

III.2.3. Différentes méthodes de la commande vectorielle

La commande vectorielle de la MADA peut être directe ou indirecte

III.2.3.1. Commande vectorielle directe de la MADA

La méthode directe consiste à réguler indépendamment les puissances générés par la MADA en synthétisant sur chaque axe la valeur de la tension de référence à imposer pour l'onduleur côté machine, des simple boucles de puissance sont ajoutées et associées à des régulateurs de type PI généralement, un ajout de terme de compensation est également nécessaire pour avoir les valeurs de puissance de référence Fig.III-2.

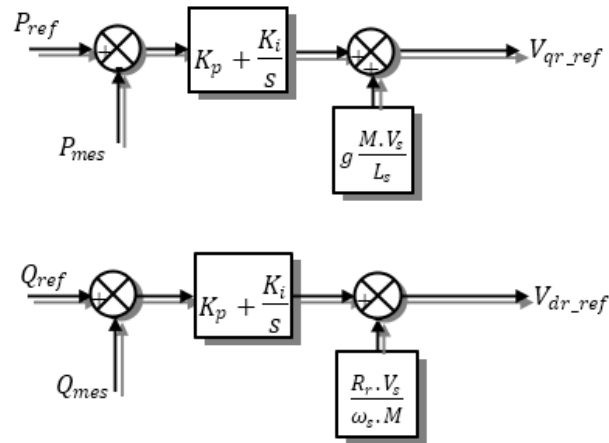


Figure III-2: Schéma en bloc de la commande vectorielle direct des puissances de la MADA

III.2.3.2. Commande vectorielle indirect de la MADA :

Le principe de cette commande est comme suit Fig.III-3 :

- ✓ A partir des puissances active et réactive, nous synthétisons les courants de références sur chaque axe (I_{dr}, I_{qr}).
- ✓ A partir des courants rotorique de référence nous obtenons les tensions de commande de l'onduleur coté machine.
- ✓ Un retour d'état est associé avec un régulateur de type PI pour la boucle de puissances et de courants.
- ✓ Des termes de compensations en fonction du glissement sont ajoutés permettant ainsi d'obtenir un contrôle de la MADA pour les valeurs de glissement importantes.

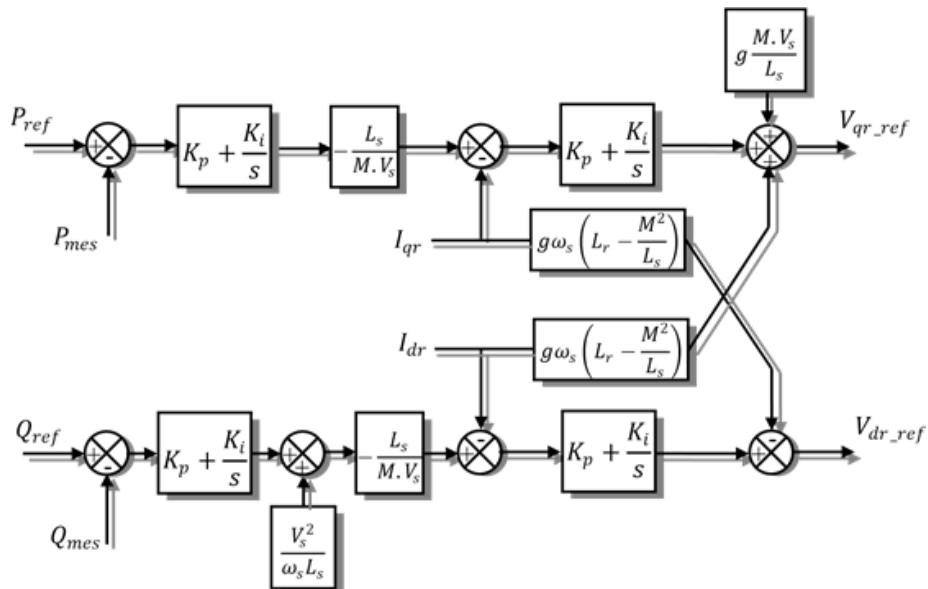


Figure III-3: Schéma en bloc de la commande vectorielle indirect de puissance de la MADA

C'est ce type de commande que nous utiliserons pour la suite de notre travail, et qui permet de contrôler l'onduleur côté machine.

III.3. Modélisation de l'interconnexion au réseau

III.3.1. Modélisation de l'onduleur côté machine et côté réseau

Dans notre cas, nous alimentons le rotor de la MADA par un onduleur à deux niveaux, il est constitué de six interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture, généralement des IGBT ou bien des GTO pour les grandes puissances. Pour en faciliter la modélisation de l'onduleur, nous utilisons un modèle à interrupteurs idéaux, i.e. : nous considérons une commutation instantanée des interrupteurs [8, 11].

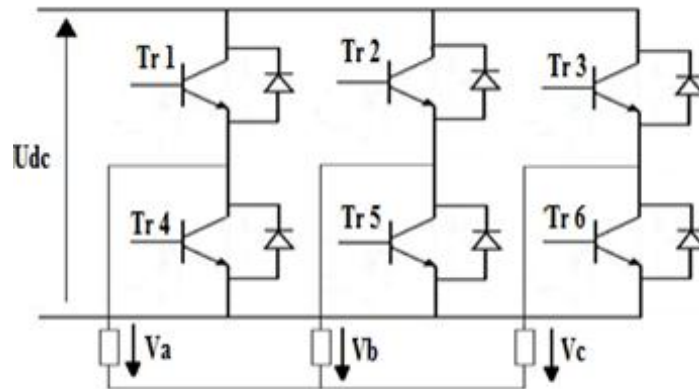


Figure III-4: Schéma d'un onduleur de tension à deux niveaux

L'objectif est d'exprimer les tensions de ligne en fonction de la tension du bus continu et de l'état des commutateurs. Nous définissons les variables S_a , S_b , S_c en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

➤ Branche 1

$S_a=0$ si Tr1 est en position off et Tr4 est à on.

$S_a=1$ si Tr1 est en position on et Tr4 est à off.

➤ Branche 2

$S_b=0$ si Tr2 est en position off et Tr5 est à on.

$S_b=1$ si Tr2 est en position on et Tr5 est à off.

➤ Branche 3

$S_c=0$ si Tr3 est en position off et Tr6 est à on.

$S_c=1$ si Tr3 est en position on et Tr6 est à off.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{DC}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{DC}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{DC}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$V_a + V_b + V_c = 0$$

On déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{III. 13})$$

D'où on obtient :

$$\begin{cases} V_a = \frac{V_{DC}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ V_b = \frac{V_{DC}}{3}(2S_b - S_c - S_a) \\ V_c = \frac{V_{DC}}{3}(S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (\text{III. 14})$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 15})$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie.

➤ Principe de la MLI

La technique de modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoïdale (Fig.III-5) consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire $W_m(t)$ de fréquence f_p , que nous appellerons porteuse, à trois signaux de commande, notés V_a, V_b et V_c . Ces signaux V_i sont les images des tensions que l'on souhaite appliquer sur chaque phase [8, 9].

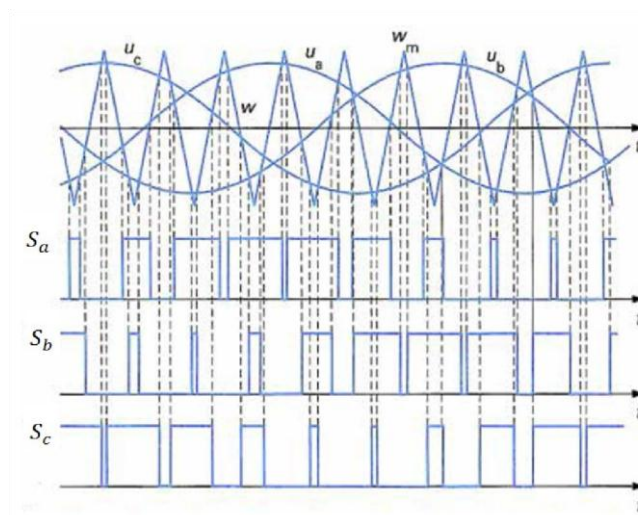


Figure III-5: Les différents signaux de commande des interrupteurs

Le signal de commande de chaque interrupteur est obtenu comme suit :

$$\begin{cases} S_i = 1 \text{ si } V_i(t) \geq W_m(t) \\ S_i = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

III.3.2. Modélisation de bus continu

L'évolution de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif absorbé par le condensateur Fig.III-6, nous pouvons écrire alors :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_c$$

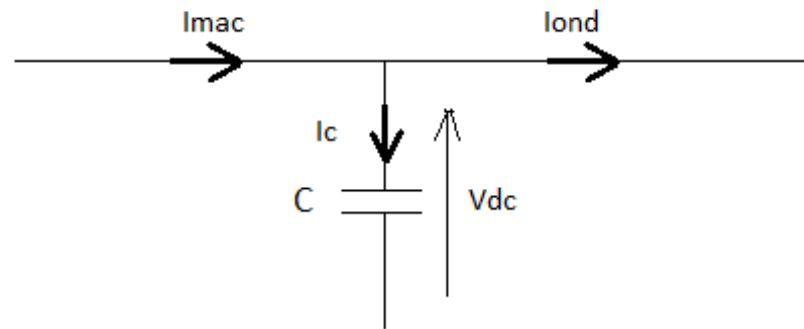


Figure III-6: Schéma représentatif de bus continu

Le courant dans le condensateur est donné par la relation :

$$i_c = i_{mac} - i_{ond}$$

Tel que :

V_{dc} : La tension de bus continu.

i_{mac} : Le courant modulé par le convertisseur côté machine.

i_{ond} : Le courant absorbé par le convertisseur côté réseau.

i_c : Courant de condensateur.

C : La valeur de la capacité

Ainsi, le bus continu sera modélisé par la fonction de transfert suivante :

$$V_{dc} = \frac{1}{C \cdot s}$$

Afin de générer un courant au réseau, il faut que la tension du bus continu V_{dc} soit supérieure à la valeur crête des tensions composées apparaissant du côté du filtre (i.e. $V_{dc} > \sqrt{6} V_{s\text{eff}}$) [8, 9]. .

III.3.3. Modélisation du filtre passif

Un filtre passif de type R_f, L_f est inséré entre l'onduleur côté réseau et le point de raccordement commun (PCC), il permet de filtrer les courants générés par l'onduleur, le fait d'introduire un condensateur de filtrage au niveau du bus continu nous évite d'ajouter des condensateurs au filtre.

Les équations du réseau s'écrivent en fonction des tensions de réseau V_{gi} et les tensions fournies par l'onduleur V_{oi} :

$$\begin{cases} V_{ga} - V_{oa} = R_f i_{ga} + \frac{L_f di_{ga}}{dt} \\ V_{gb} - V_{ob} = R_f i_{gb} + \frac{L_f di_{gb}}{dt} \\ V_{gc} - V_{oc} = R_f i_{gc} + \frac{L_f di_{gc}}{dt} \end{cases} \quad (III.16)$$

Nous appliquons la transformée de R.H.Park au système d'équations III.16 :

$$\begin{cases} V_{gd} - V_{od} = R_f i_{gd} - L_f \omega_s i_{gq} + \frac{L_f di_{gd}}{dt} \\ V_{gd} - V_{oq} = R_f i_{gq} + L_f \omega_s i_{gd} + \frac{L_f di_{gq}}{dt} \end{cases} \quad (III.17)$$

Nous appliquons la transformée de Laplace au système d'équations III.17 :

$$\begin{cases} V_{gd} = (R_f + sL_f)I_{gd} - L_f \omega_s I_{gq} + V_{od} \\ V_{gd} = (R_f + sL_f)I_{gq} + L_f \omega_s I_{gd} + V_{oq} \end{cases} \quad (III.18)$$

Nous obtenons un schéma équivalent de la liaison au réseau Fig.III.7 :

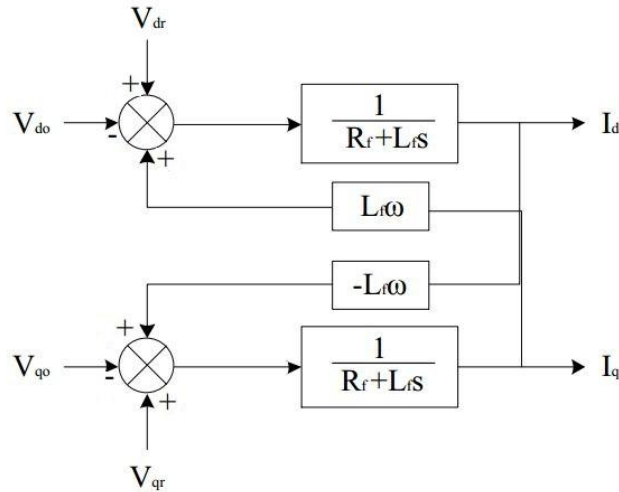


Figure III-7: Schéma équivalent de la liaison au réseau

III.4. Commande des convertisseurs d'EP

La MADA est associée à deux convertisseurs d'électronique de puissance reliés entre eux par un bus continu, nous détaillons ci-dessous les stratégies de commandes de chaque convertisseur.

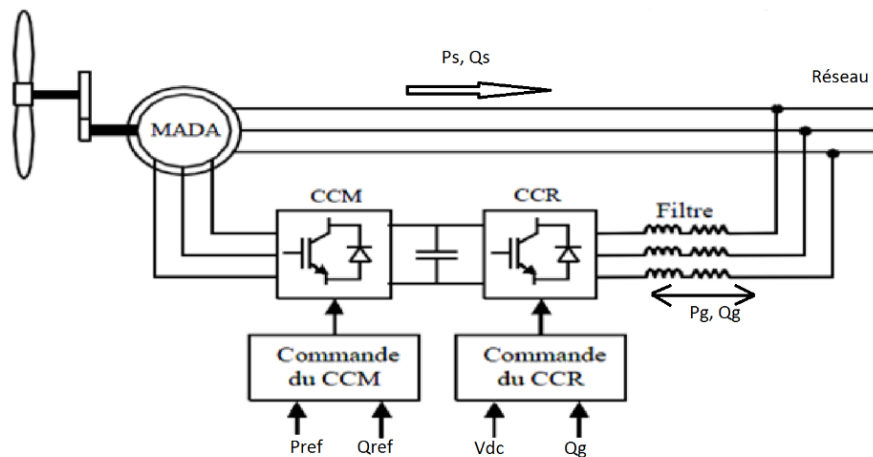


Figure III-8: Schéma représentant les stratégies de commande des convertisseurs associés à la MADA

III.4.1. Commande de convertisseur côté machine (CCM)

La commande du convertisseur côté machine est basée sur la technique de commande vectorielle indirecte de puissance élaborée en III.2, les tensions calculées par les régulateurs au niveau de l'étage de régulation de puissance vont servir comme des tensions de référence pour le CCM commandant ainsi l'ouverture et la fermeture des transistors.

Le CCM fonctionne en onduleur ou en redresseur commandé [9], dans le cas où la MADA tourne en hypo-synchrone le CCM fonctionne en onduleur et le flux de puissance est entrant vers le rotor. Dans le cas où la MADA tourne en hyper-synchrone le CCM fonctionne en redresseur commandé et le flux de puissance sortant du rotor, c'est cette configuration qui est la plus utilisée car elle permet de segmenter le flux de puissances entre le stator et le rotor.

La MADA peut fonctionner à facteur de puissance 0.95 arrière à 0.98 avant, l'idéal serait de faire fonctionner la MADA à facteur de puissance unitaire pour éviter la consommation de l'énergie réactive à partir du réseau.

Si la MADA est associée à une turbine éolienne cas des aérogénérateurs des algorithmes de MPPT (Maximum Power Point Tracking) sont utilisés pour donner une consigne de puissance. Dans ce mémoire nous avons simulé un banc d'essai constitué d'une machine à courant continu qui entraîne la MADA, nous avons fixé une puissance de référence égale à 3,5 kW ce qui correspond à la puissance nominale de la machine.

➤ **Simulations et interprétations**

Afin de vérifier l'efficacité de commande vectorielle indirecte nous avons procédé par simulation en utilisant le logiciel Matlab/Simulink.

Le système reçoit comme référence :

- Pour la puissance active : 0 puis -2kW puis -3,5kW.
- Pour la puissance réactive : 0 pour assurer un fonctionnement a facteur de puissance unitaire.

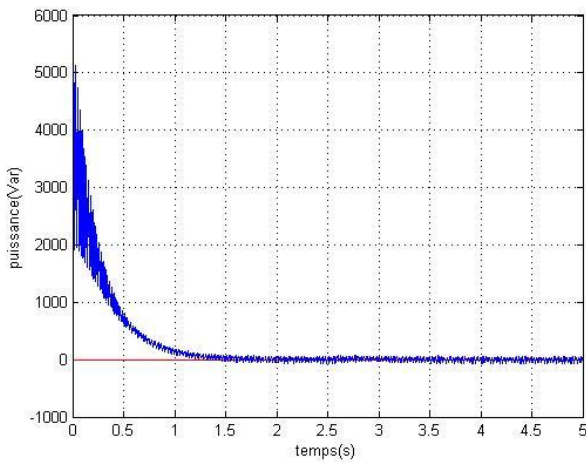


Figure III-9: Puissance réactive

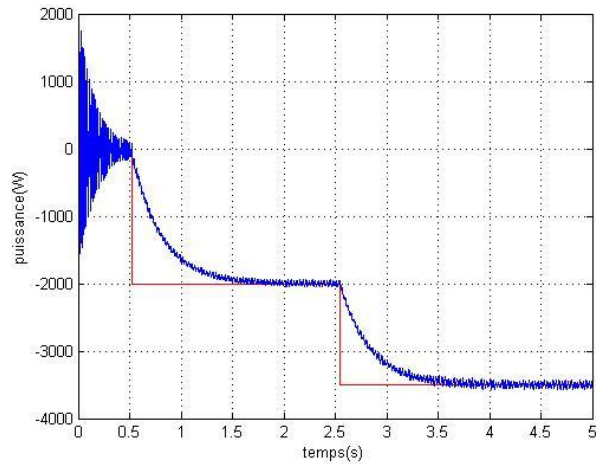


Figure III-10: Puissance active

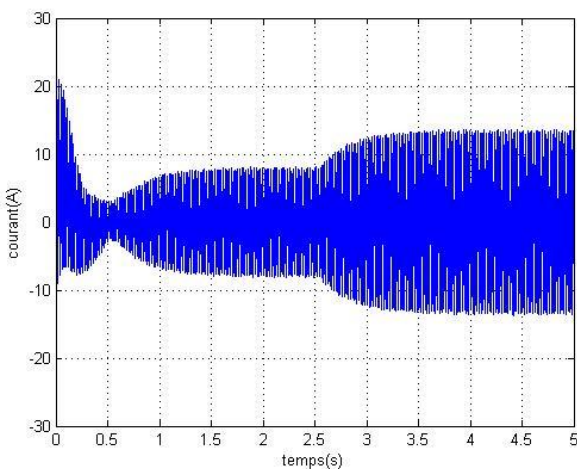
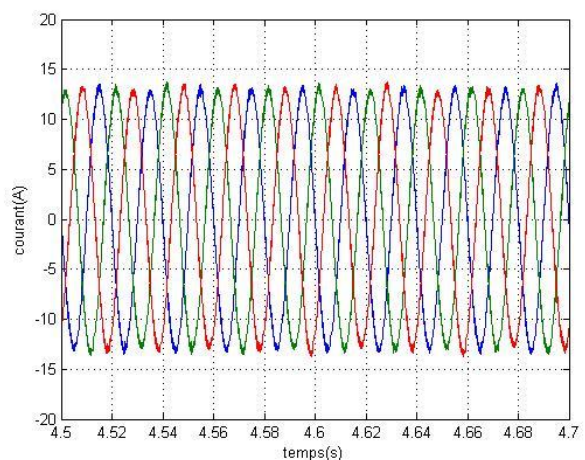


Figure III-11: (a) évolution du courant statorique



(b) Zoom sur les courants statorique

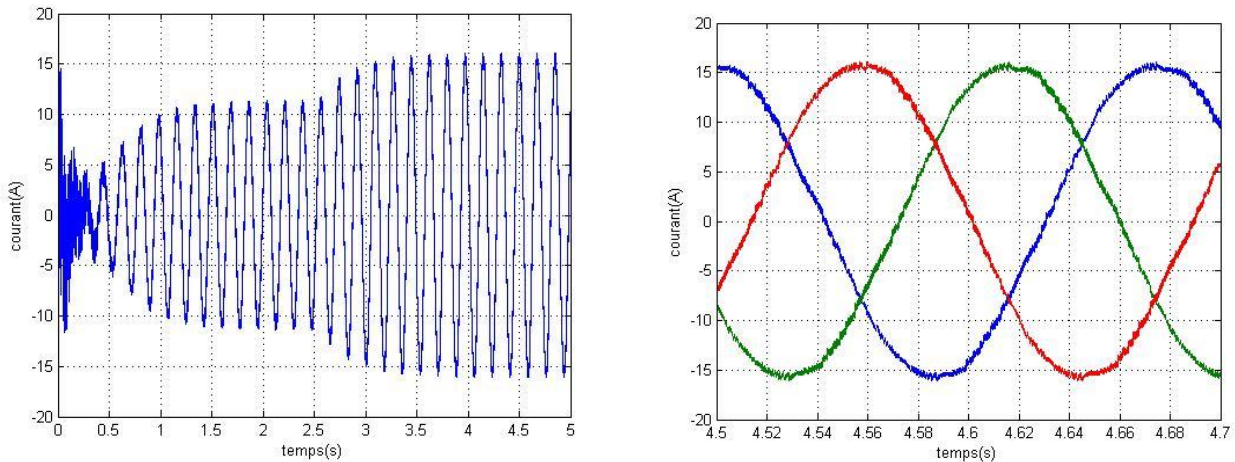


Figure III-12 : (a) évolution du courant rotorique

(b) Zoom sur les courants rotorique

-la puissance réactive est maintenue à sa valeur de consigne nulle, ce qui permettra à la MADA de fonctionner à facteur de puissance unitaire (Fig.III-9). Une consommation de puissance réactive est inévitable au moment de l'accrochage du générateur sur le réseau.

-Nous remarquons un transitoire sur la puissance active (Fig.III-10) dès qu'une nouvelle consigne est imposée. Nous avons utilisé un correcteur de type PI pour régler la réponse du système, la technique de compensation des pôles dans la synthèse des régulateurs nous permet d'imposer une constante de temps adaptée obtenant ainsi une réponse similaire à un système de premier ordre.

-L'amplitude des courants rotorique et statorique augmente au fur et à mesure que la consigne de puissance imposée à la machine augmente (Fig.III-12).

-Les figures (III-11-b et III-12-b) montrent un zoom sur les courants statorique et rotorique nous constatons qu'ils forment un système triphasé et équilibré de fréquences respectivement de 50Hz et $g \cdot 50\text{Hz}$.

-La perturbation de haute fréquence est due à l'onduleur MLI qui alimente le rotor, ces perturbations sont transmises au stator par effet de couplage électromagnétique.

III.4.2. Commande de convertisseur côté réseaux (CCR)

Le convertisseur côté réseau de la figure III.13 se place entre le bus continu et le filtre passif, ce convertisseur a la spécificité d'être bidirectionnel, il permet un échange de puissance dans les deux sens et donnant ainsi la possibilité de fonctionner en hypo-synchrone et hyper-synchrone.

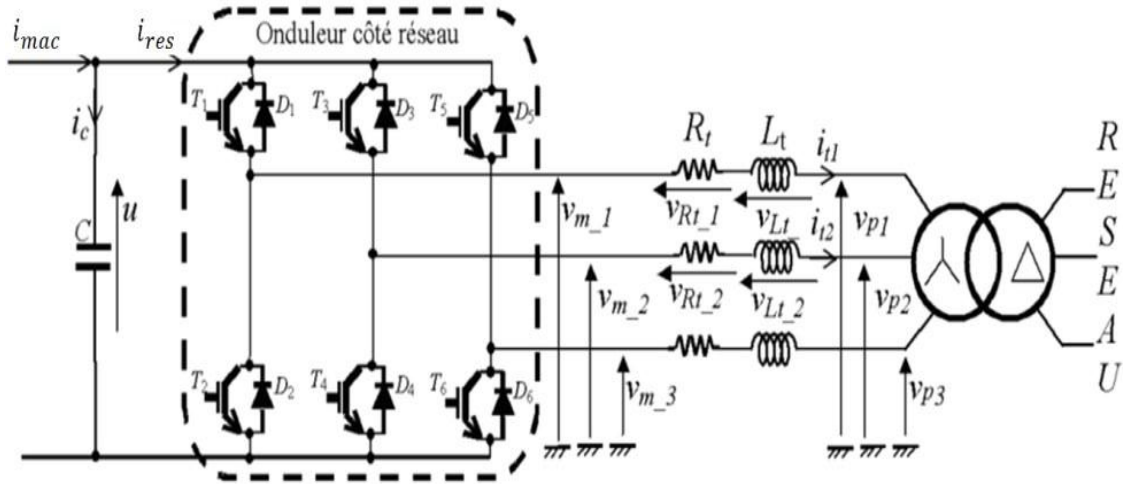


Figure III-13: Liaison de CCR au réseau [10]

Le rôle de ce convertisseur est de maintenir la tension du bus continu constante en absorbant de l'énergie du réseau quand la tension du condensateur est inférieure à la valeur de référence et en envoyant de l'énergie dans l'autre cas, ceci se fait par le biais de deux étages de régulation, le premier consiste à contrôler les courants qui circulent dans le filtre. Le deuxième étage de régulation a pour rôle de maintenir la tension de bus continu constante.

III.4.2.1. Régulation des courants coté réseaux

Les puissances active et réactive transitée au réseau à travers le filtre sont données par :

$$\begin{cases} P = V_{resd}I_{fd} + V_{resq}I_{fq} \\ Q = V_{resq}I_{fd} - V_{resd}I_{fq} \end{cases} \quad (III.19)$$

De l'équation III.19 nous pouvons tirer l'expression des courants de référence à imposer :

$$\begin{cases} I_{fd_{ref}} = \frac{P_{ref} \cdot V_{resd} + Q_{ref} \cdot V_{resq}}{V_{resd}^2 + V_{resq}^2} \\ I_{fq_{ref}} = \frac{P_{ref} \cdot V_{resq} - Q_{ref} \cdot V_{resd}}{V_{resd}^2 + V_{resq}^2} \end{cases} \quad (III.20)$$

Une composante de courant est maintenue nulle pour assurer un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, tandis que l'autre composante sert à réguler la tension de bus continu.

A partir du système d'équations III.20 et le modèle de la liaison au réseau établie en III.3.3, nous pouvons établir le schéma de commande illustré par la figure III.14:

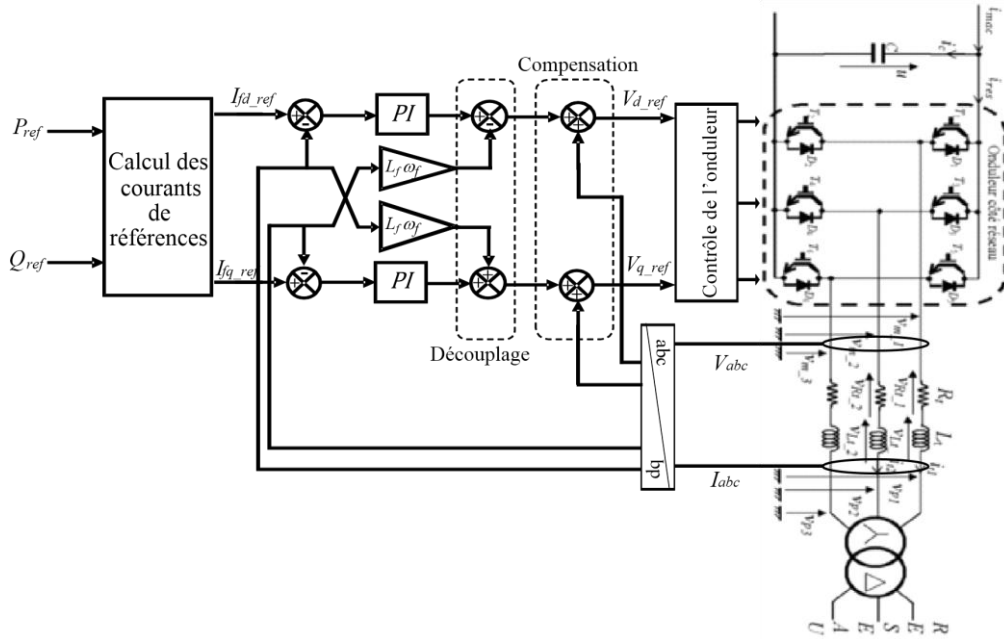


Figure III-14: Contrôle des courants côté réseau [10]

Le convertisseur côté réseau est commandé par deux grandeurs, la puissance active et la puissance réactive. La puissance réactive de référence sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire, et la puissance active sera estimée à partir de la valeur référence de la tension du bus continu.

III.4.2.2. Régulation de la tension de bus continu

Jusqu'à présent nous avons supposé que la tension dans l'étape continue était constante, mais elle va réellement dépendre des puissances échangées entre le rotor de la machine et le réseau à travers CCR et CCM. On peut exprimer le courant dans le condensateur C par :

$$i_c = i_{mac} - i_{res}$$

En multipliant par la tension du bus continu V_{dc} on trouve :

$$P_c = P_{mac} - P_{res}$$

Tel que :

$P_c = V_{dc} \cdot i_c$: est la puissance emmagasinée dans le condensateur.

$P_{mac} = V_{dc} \cdot i_{mac}$: est la puissance transitée par le convertisseur côté rotor.

$P_{res} = V_{dc} \cdot i_{res}$: est la puissance transitée par le convertisseur côté réseau

Et :

$$P_{res} = P_{mac} - P_c$$

Ainsi, le schéma de régulation sera le suivant :

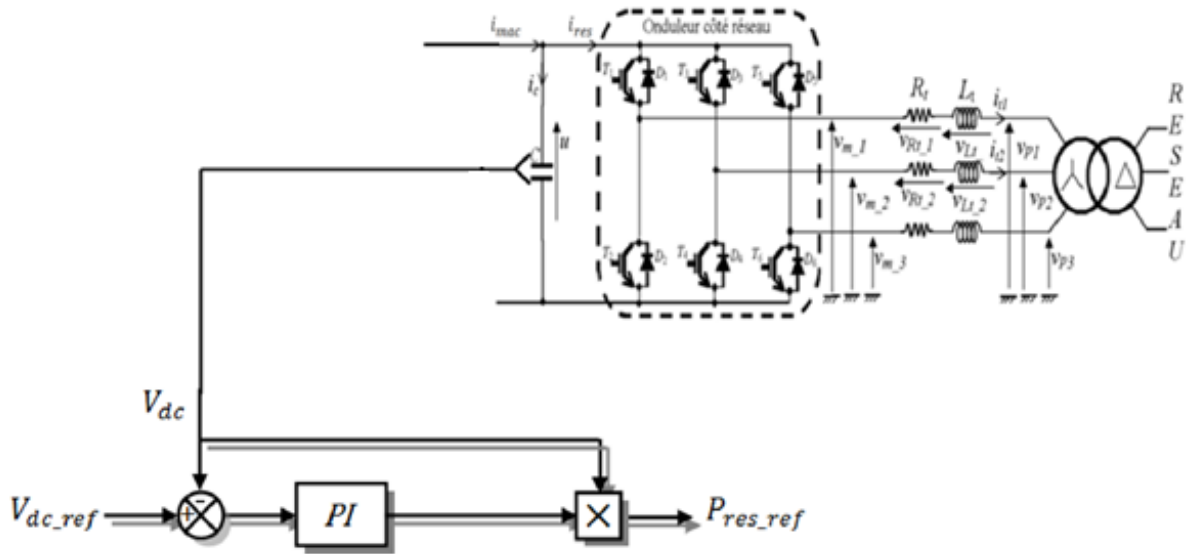


Figure III-15: Schéma de régulation de bus continu [10]

III.4.2.3. Simulation et interprétations

Nous présentons dans cette partie les résultats de simulation du convertisseur côté réseau couplé à un réseau de tension simple de 127V, nous avons fixé un courant d'entrée de 5A, et une tension de référence de bus continu de 500V et une consigne de puissance réactive égale à zéro.

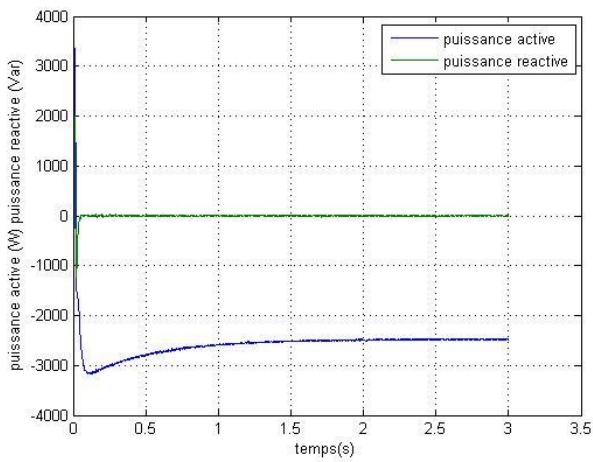


Figure III-16: Puissances envoyées au réseau

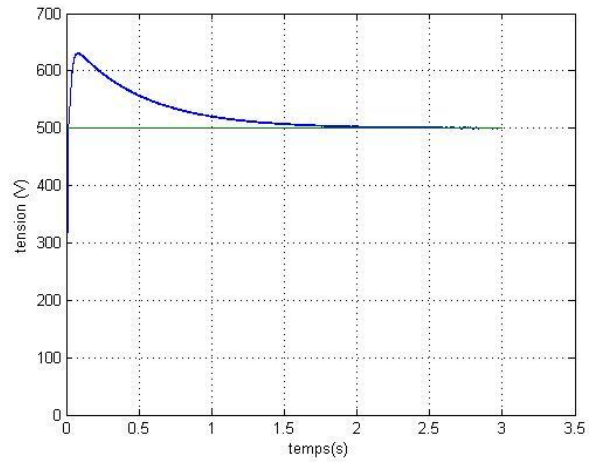


Figure III-17: Tension de bus continu

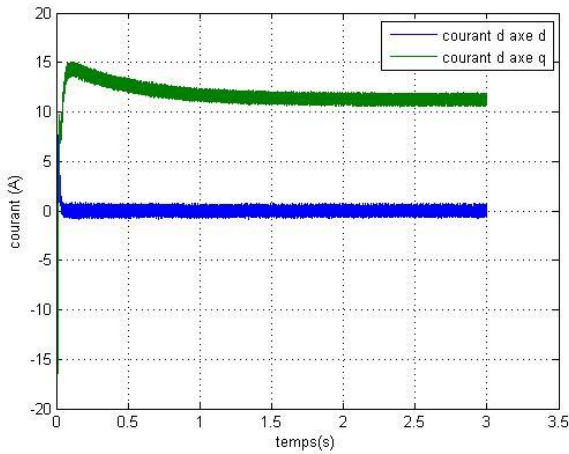


Figure III-18: Courants de réseau suivant les axes d, q

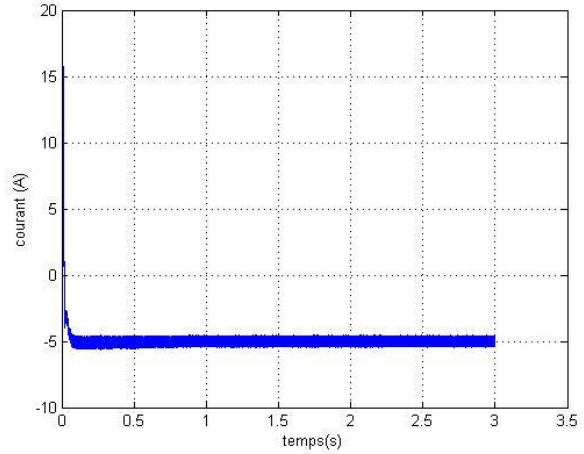
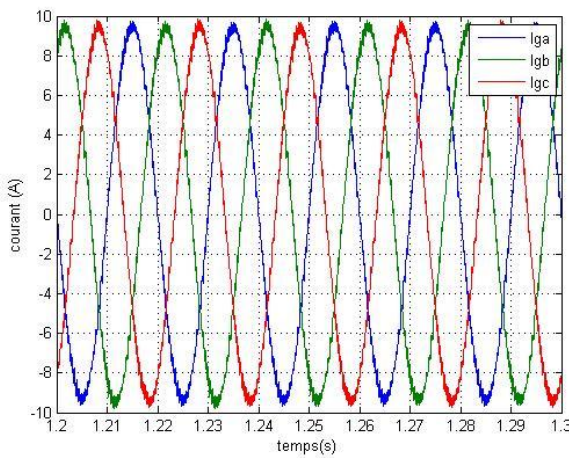
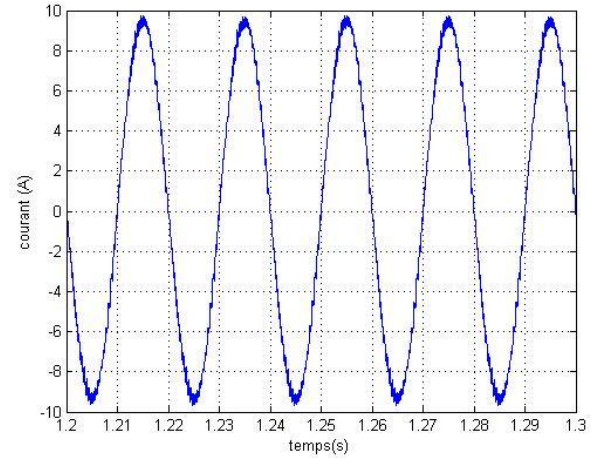


Figure III-19: Courant modulé par l'onduleur



- a -



- b -

Figure III-20 : Courants de ligne
(a) : courants triphasés (b) : courant d'une phase

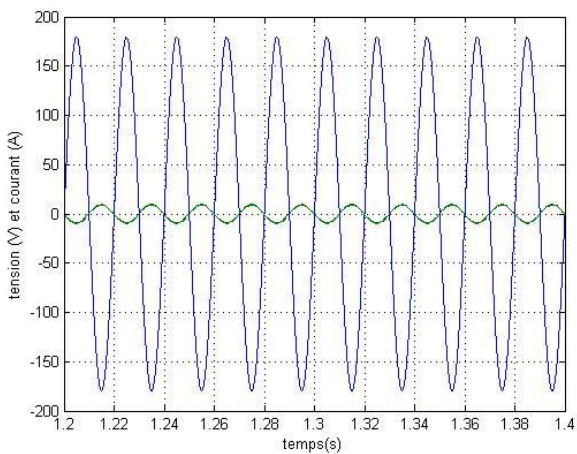


Figure III-21 : Tension simple et courant de ligne

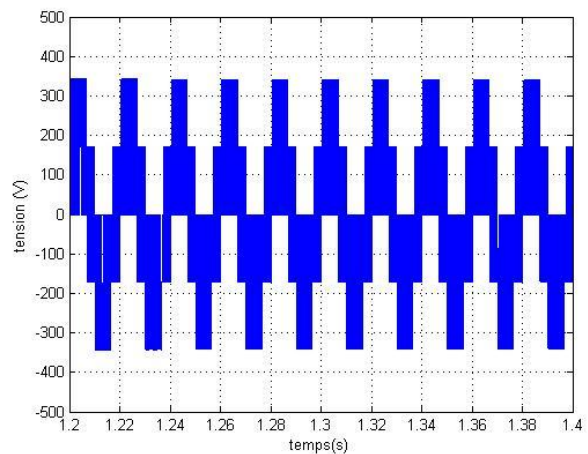


Figure III-22 : Tension de l'onduleur MLI

- Le contrôle des puissances active et réactive envoyées au réseau est assuré par une commande découplée en P et Q. Le contrôle des puissances revient à commander les courants de réseau d'axe d et q dans le repère de RH.PARK (Fig.III-16). Au moment de l'interconnexion du

convertisseur au réseau nous remarquons une consommation des puissances active et réactive ceci est inévitable car le condensateur était au départ déchargé.

- Nous constatons que la tension de bus continu suit sa référence qui est fixée à 500V avec un dépassement qui est due au type de régulation choisi (PI) qui donne un système de second ordre (Fig.III-17).
- Dans notre cas la tension du réseau a la forme suivante $V_a = \sqrt{2} V_m \sin(\omega t)$ ce qui implique que le courant d'axe d soit nulle pour assurer un transfert de puissance à facteur unitaire et le courant d'axe q est utilisé pour réguler la puissance transmise au réseau (Fig.III-18).
- La figure montre le courant absorbé par l'onduleur, ce courant prend une valeur négative au début ceci signifie qu'il traverse le convertisseur dans le sens inverse et ceci permet le chargement du condensateur. Dès que le condensateur est chargé le courant dans le convertisseur change son sens pour s'opposer au courant rentrant de l'autre côté et assurant ainsi une tension de bus continu constante (Fig.III-19).
- La figure montre que les courants délivrés par le convertisseur nous remarquons que ces courants constituent un système triphasé équilibré avec un fondamental de fréquence de 50Hz (Fig.III-20).
- La figure montre un zoom sur la tension et le courant de réseau nous remarquons bel et bien que la tension et le courant sont en opposition de phase ce qui correspond à un mode de fonctionnement à facteur de puissance unitaire (Fig.III-21).
- La figure représente la tension de sortie de l'onduleur cette valeur est limitée à (2/3) de la tension de bus continu (Fig.III-22). C'est la commande intégrée au niveau du bloc de commande qui détermine la valeur de tension référence que l'onduleur doit délivrer.

III.5. Simulation de la chaîne de conversion

Nous joignons tous les composants de la chaîne de conversion y compris la commande de puissances statorique via le CCM, et le bloc permettant la commande de CCR.

La turbine éolienne a été remplacée par une machine à courant continu formant ainsi un banc d'essai constitué d'une MADA avec son électronique de commande dotée d'une puissance de 3,5kW et une MCC fonctionnant à excitation séparée d'une puissance de 4kW.

La MADA à une vitesse de 1720 tr/min, le CCM reçoit une référence de -3,5kW pour la puissance active et 0Var pour la puissance réactive. Le CCR reçoit une consigne de 0Var pour la puissance réactive tout en maintenant la tension de bus continu constante à 500V.

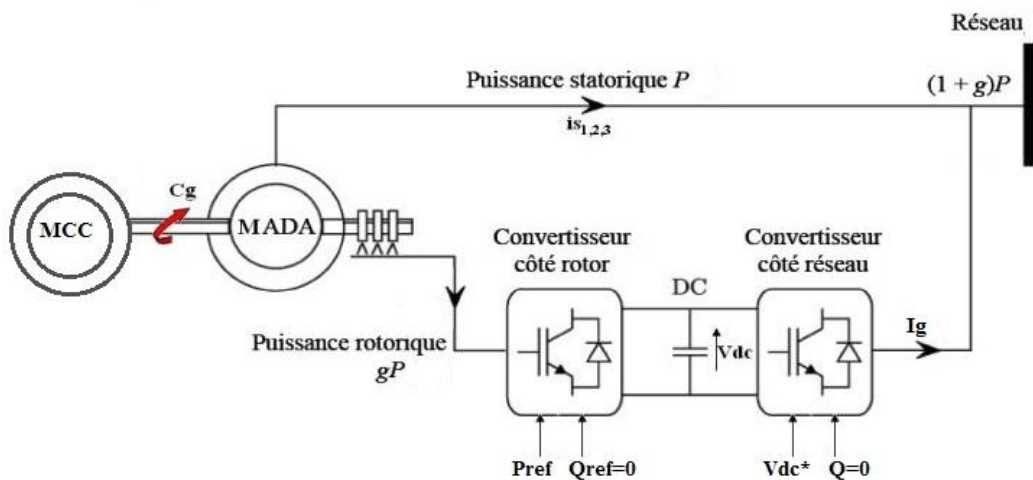
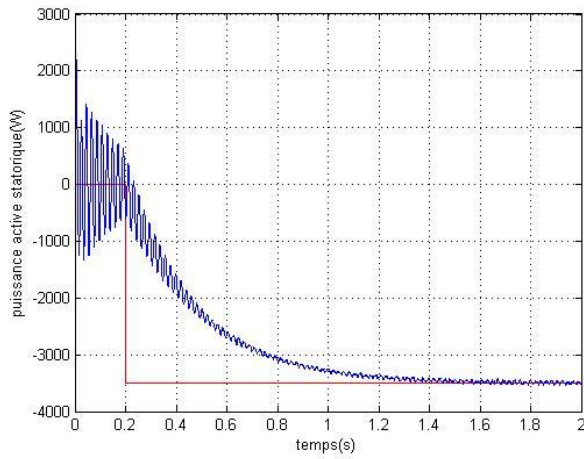
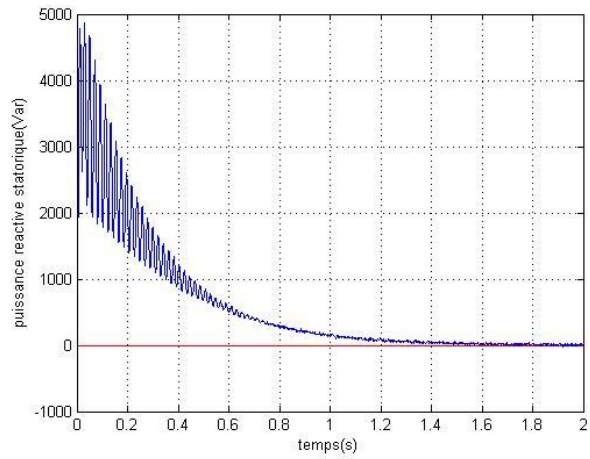


Figure III-23: Représentation schématique du système de conversion électromécanique

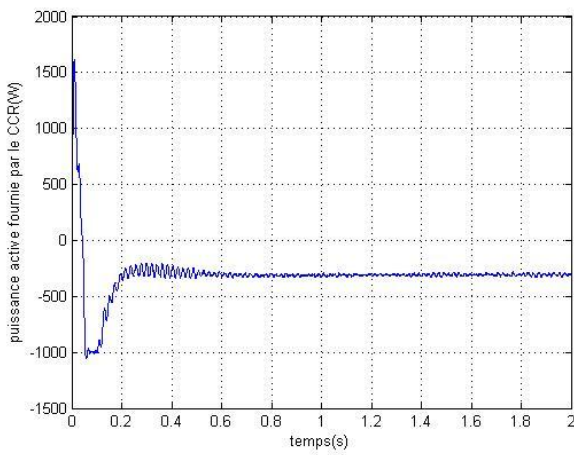
III.5.1. Résultats de simulation :



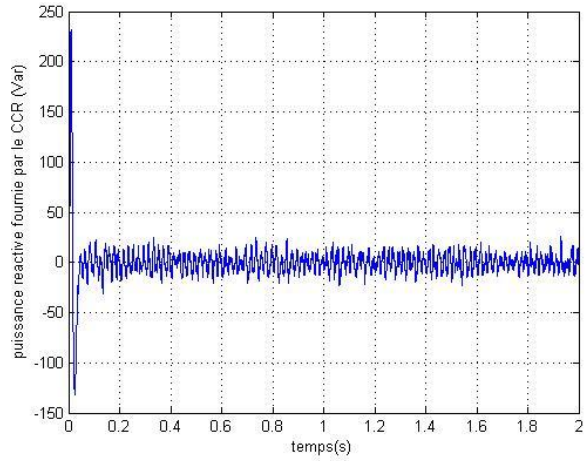
- a -



- b -

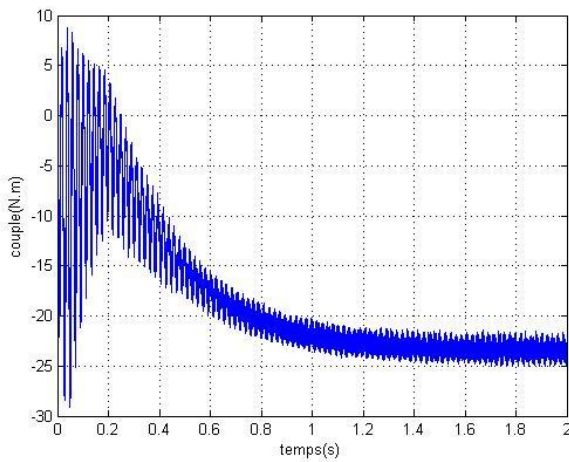


- c -

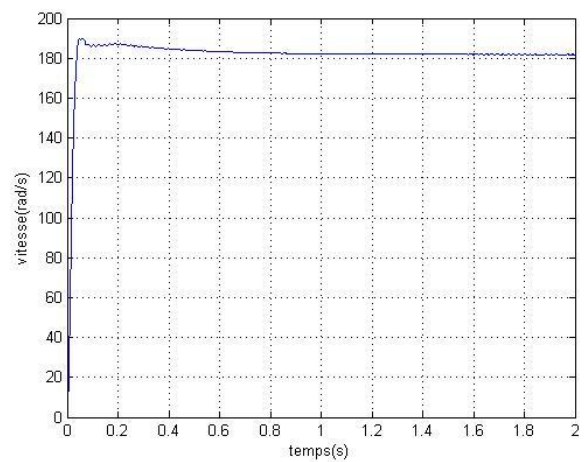


- d -

Figure III-24: Les puissances échangées entre la MADA et le réseau
 (a) : puissance active statorique, (b) : puissance réactive statorique
 (c) : puissance active envoyée via le CCR, (d) : puissance réactive échangée par le CCR

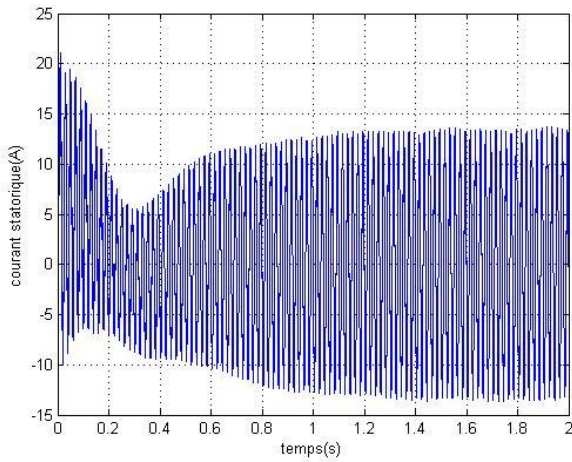


- a -

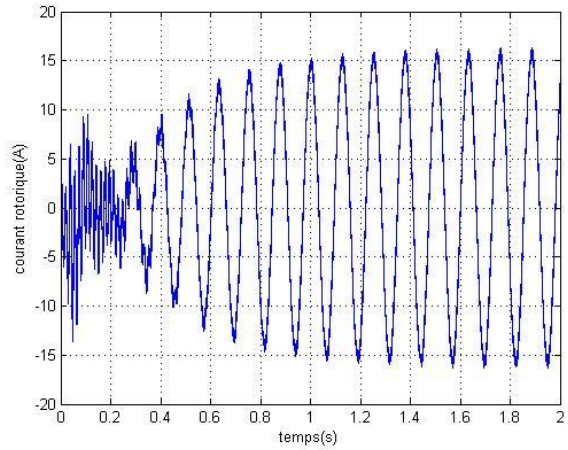


- b -

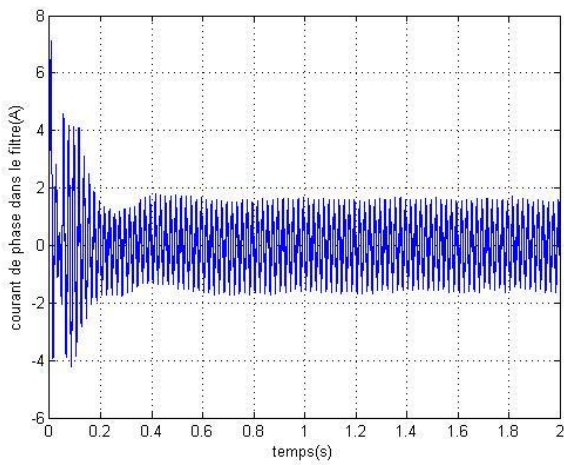
Figure III-25: Vitesse et couple développées par la MADA
 (a) : vitesse, (b) : couple



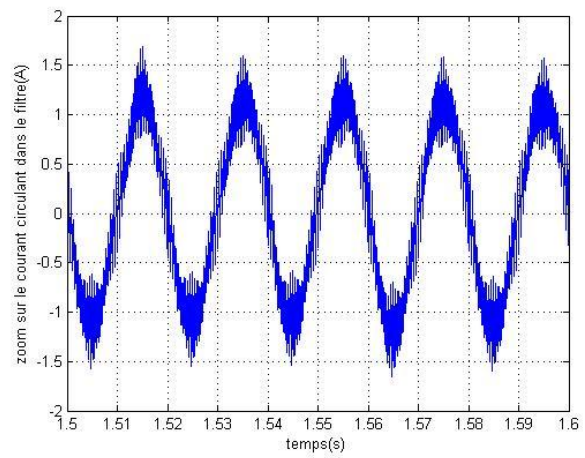
- a -



- b -

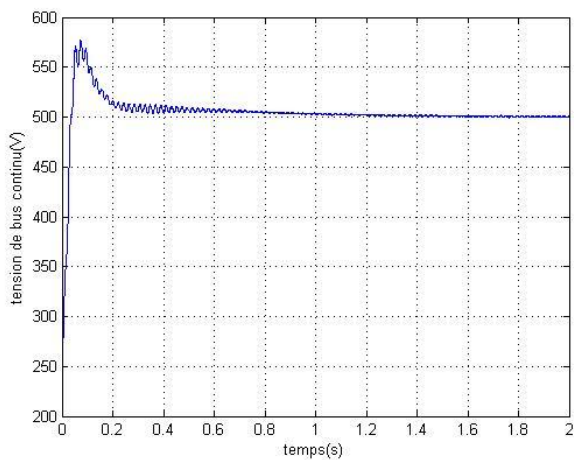


- c -

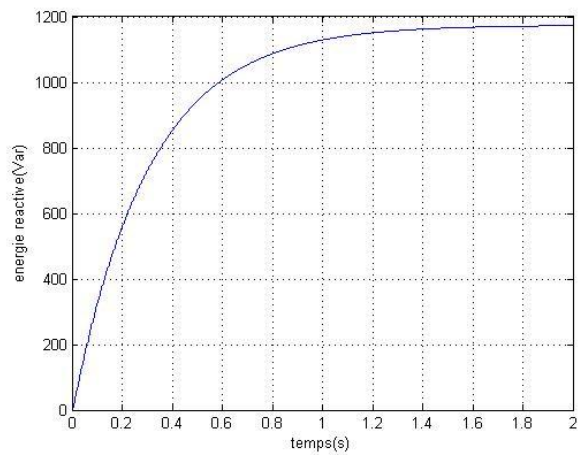


- d -

Figure III-26: Les courants circulant dans la MADA
 (a) : courant statorique, (b) : courant rotorique
 (c) : courant dans le CCR, (d) : zoom sur le courant dans le CCR



- a -



- b -

Figure III-27: Tension de bus continu et énergie réactive (a) : tension de bus continu, (b) : énergie réactive

III.5.2. Interprétations

- La MADA tourne à une vitesse de 1720tr/min, ce qui correspond à un mode de fonctionnement en hyper-synchrone pour un glissement de -14.6% (Fig.III-25).
- Les valeurs de consignes imposées à la MADA ont été soigneusement choisies afin de reproduire les grandeurs nominales de la machine. Le couple se stabilise à sa valeur nominale de -23N.m, les perturbations de hautes fréquences qui apparaissent sur le couple sont dues à l'alimentation par l'onduleur MLI, ces perturbations n'apparaissent pas sur la vitesse vu sa grande valeur de constante de temps mécanique.
- Les puissances active et réactive fournies par le stator suivent leurs références données de même pour la puissance réactive échangée par le CCR qui est maintenue nulle pour assurer un fonctionnement à facteur de puissance unitaire (Fig.III-24).
- Environ 10% de la puissance nominale de la MADA est transférée par le biais du CCR.
- La tension de bus continu est maintenue à sa valeur de consigne de 500V.
- L'énergie réactive absorbée par la MADA augmente jusqu'à atteindre une valeur d'environ 0.32 Var.h, cette énergie sert à magnétiser le circuit magnétique de la machine.
- Les courants au niveau du stator et du rotor ont la forme sinusoïdale et correspondent aux valeurs nominales de la machine (Fig.III-26).

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une modélisation des éléments constituant la chaîne de conversion éolienne. Une technique de commande vectorielle découplée des puissances pour le convertisseur côté machine a été détaillée puis vérifiée par la simulation.

Nous avons présenté une technique de commande et de gestion de l'énergie aux niveaux du convertisseur côté réseau, cette technique est basée sur l'utilisation des correcteurs PI qui ont pour rôle le maintien de la tension de bus continu constante et la correction du facteur de puissance.

Nous avons simulé un banc d'essai constitué d'une machine à courant continu qui entraîne la MADA. Nous avons effectué une simulation complète de la chaîne de conversion avec tous les dispositifs de commande.

Le modèle élaboré dans ce chapitre tient compte d'un maximum de phénomènes électromagnétiques et mécaniques que nous pouvons rencontrer sur un système éolien, nous nous servons de ce modèle pour étudier l'impact des perturbations du réseau sur la chaîne de conversion électromécanique.

CHAPITRE IV : ANALYSE ET PROTECTION DE LA MADA DURANT LE CREUX DE TENSION

IV.1. Introduction

Les sources d'énergie renouvelables reçoivent de plus en plus d'attention et d'exploitation, notamment l'énergie éolienne c'est la source la plus prometteuse en terme de rendement, d'efficacité et de développement. Ces dernière année la capacité de génération du parc éoliens mondial est augmentée considérablement d'où la nécessité que ces sources d'énergie participe dans la stabilité du réseau et assure une bonne qualité de l'énergie.

Il est devenu nécessaire que les aérogénérateurs se comportent comme des sources d'énergie conventionnelle (Thermique, nucléaire et hydraulique). Plusieurs opérateurs de réseau électrique ont imposé des standards et de réglementation connu sous le nom de « grid codes ». Les aérogénérateurs interconnectés au réseau doivent satisfaire aux conditions et aux réglementations qui couvrent plusieurs parties comme la tension nominale de fonctionnement, la correction du facteur de puissance, les marges de fréquences, la capacité du réseau, le comportement durant le creux de tension.

Parmi ces types de défauts, le comportement durant le creux de tension (LVRT) est considéré comme le plus grand challenge pour les fermes éoliennes du point de vu design et technologie de fabrications. Le « Grid code » impose aux aérogénérateurs de rester connecté au réseau en cas de creux de tension pour une durée spécifiée.

IV.2. Analyse de la MADA durant un creux de tension

IV.2.1. Définition d'un creux de tension

Selon la norme IEEE 1159 un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point du réseau électrique à une valeur comprise entre 90% et 10% d'une tension de référence U_{ref} suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps. Les paramètres caractéristiques d'un creux de tension sont [15]:

➤ La durée ΔT : définie comme étant le laps de temps durant lequel la tension est inférieure à 90% - Instantané $T/2 < \Delta T < 30T$,

Momentané $30T < \Delta T < 3s$.

Temporaire $3s < \Delta T < 1mn$.

Maintenue $\Delta T > 1mn$.

➤ La profondeur ΔV : un creux de tension est détecté par le calcul de la valeur efficace « RMS » du signal sur une période du fondamental toutes les demi-périodes.

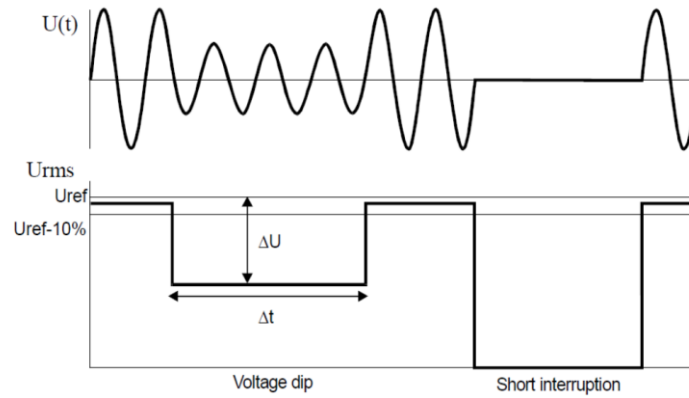


Figure IV -1: Creux et coupure de la tension de réseau [15]

IV.2.2. Simulation de la MADA durant un creux de tension

Nous présentons les résultats de simulation d'un creux de tension de profondeur de 80% et d'une durée de 500ms, l'étude a été faite sous l'environnement MATLAB/Simulink

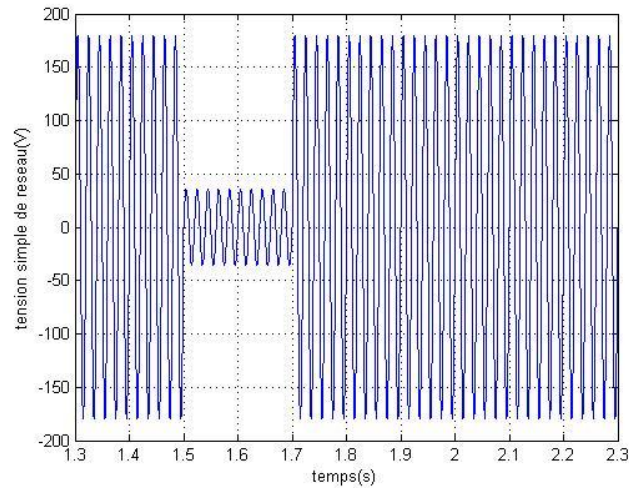
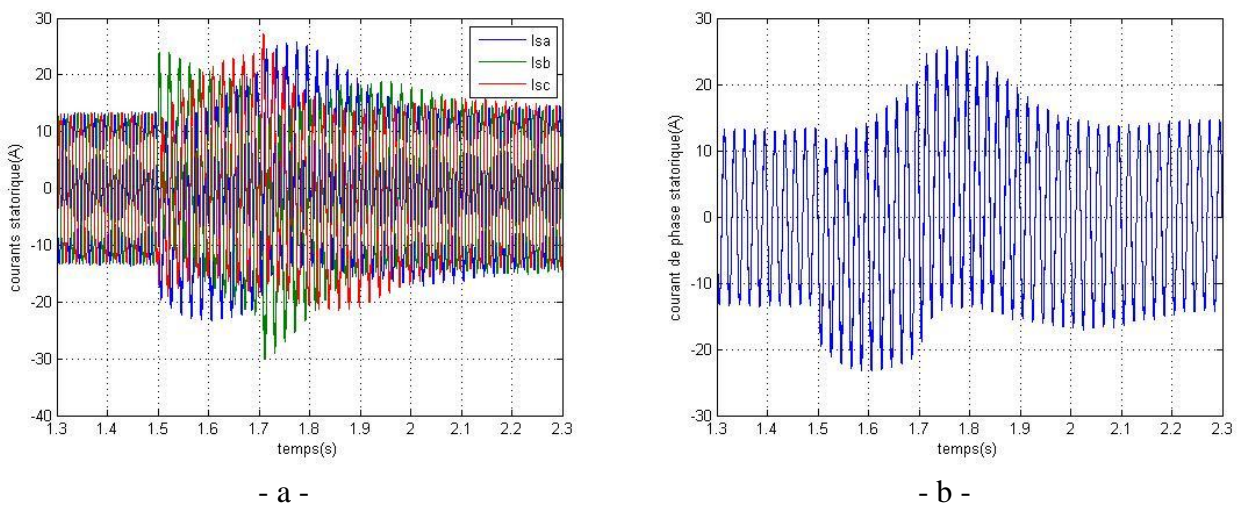


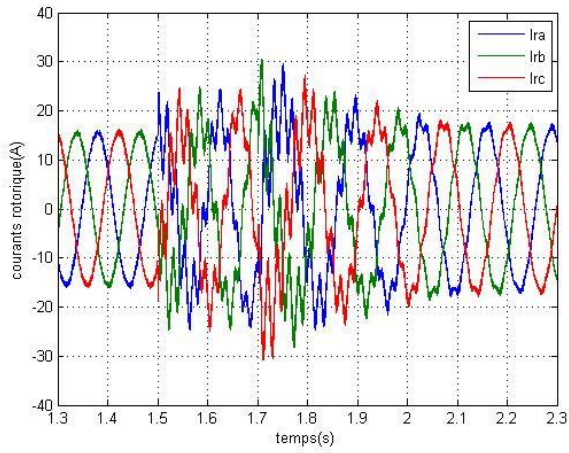
Figure IV -2: Creux de tension de 80%



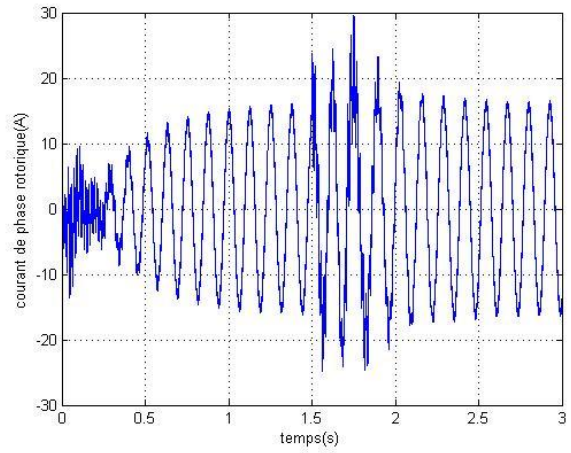
- a -

- b -

Figure IV -3: Les courants statorique durant le creux de tension
(a) : courant des trois phases (b) : courant d'une phase

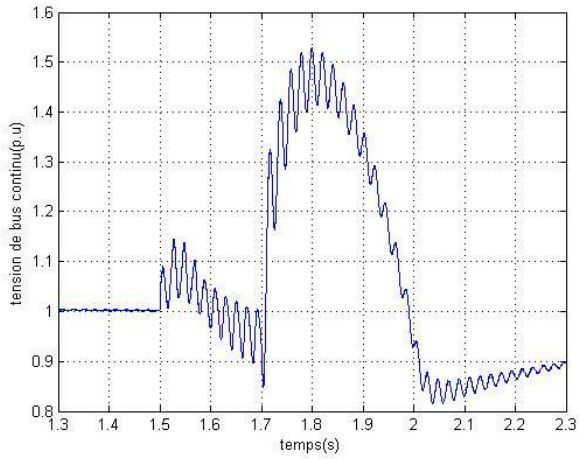


- a -

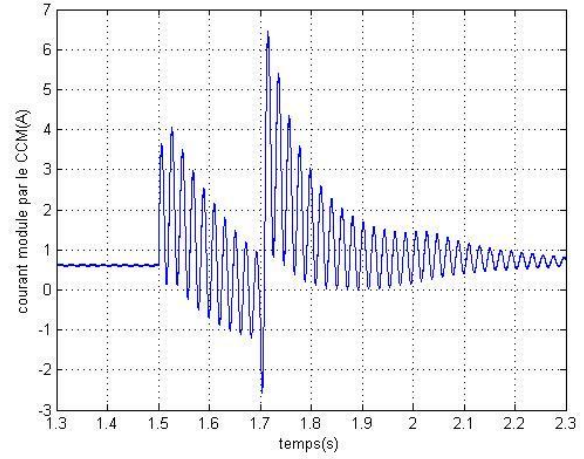


- b -

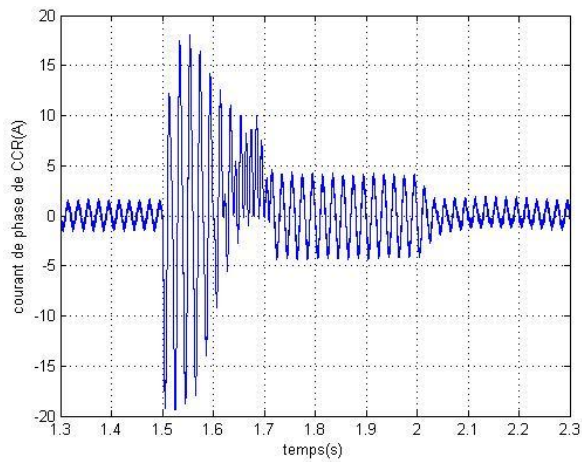
Figure IV -4: Les courants rotoriques durant le creux de tension
(a) : courant des trois phases (b) : courant d'une phase



- a -

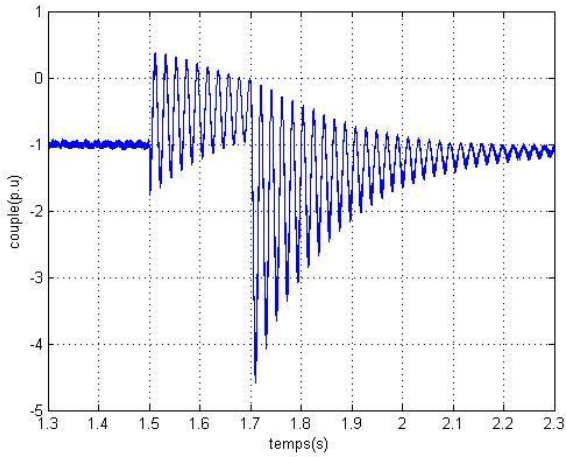


- b -

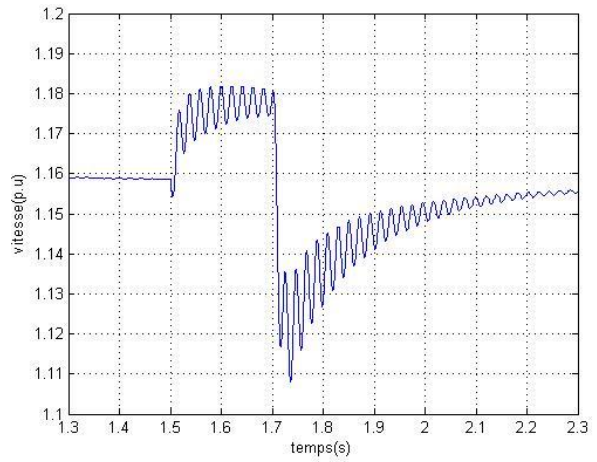


- c -

Figure IV -5: Tension du bus continu et les courants dans les convertisseurs statiques durant le creux de tension
(a) : tension du bus continu, (b) : courant modulé par le CCM, (c) : courant de phase de CCR

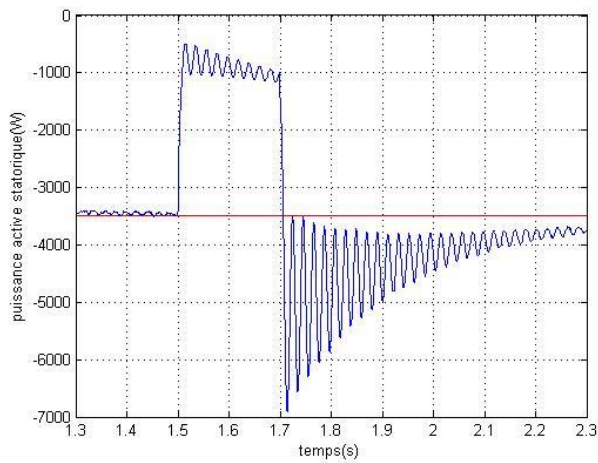


- a -

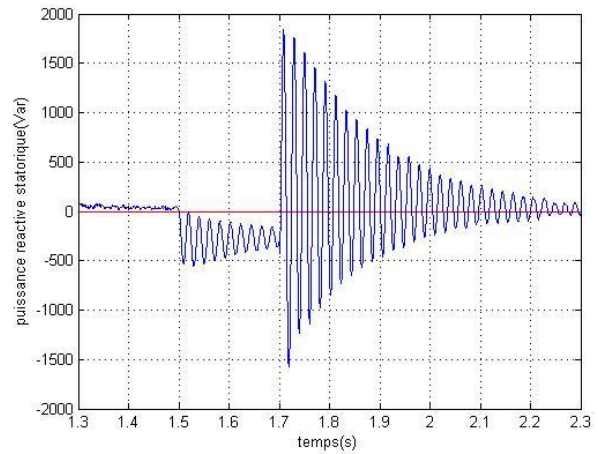


- b -

Figure IV -6: La vitesse et le couple électromagnétique durant le creux de tension
(a) : le couple (b) : la vitesse

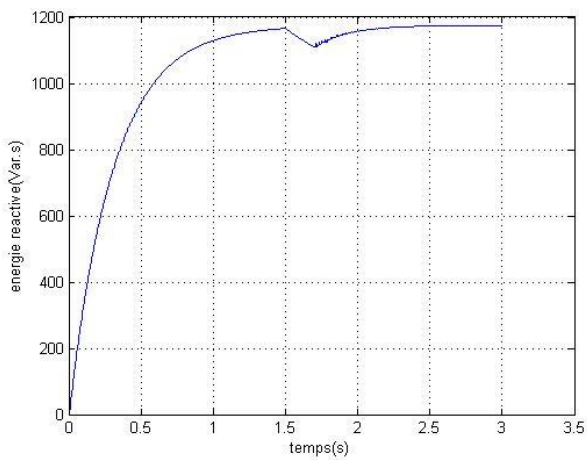


- a -

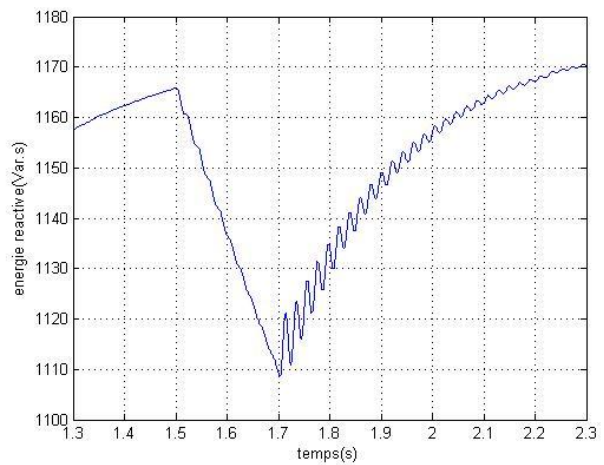


- b -

Figure IV -7: Puissances active et réactive échangées avec le réseau durant le creux de tension (a) : puissance active, (b) : puissance réactive

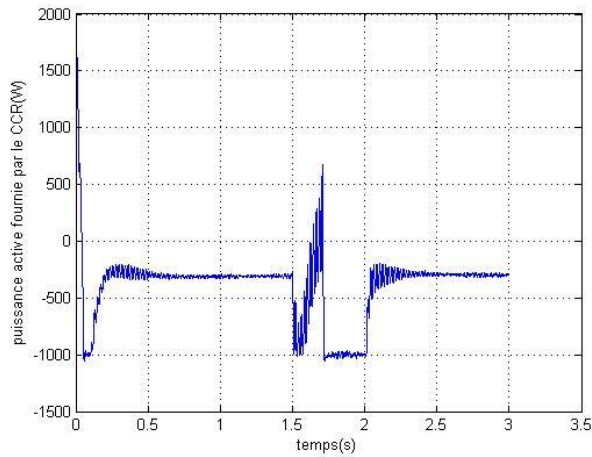


- a -

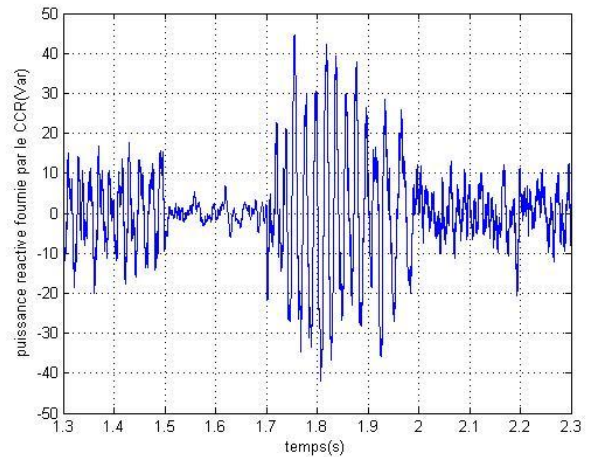


- b -

Figure IV -8: l'énergie réactive durant le creux de tension
(a) : énergie réactive, (b) : zoom sur l'énergie réactive



- a -



- b -

Figure IV -9: puissances active et réactive échangées entre le CCR et le réseau durant le creux de tension
(a) : puissance active, (b) : puissance réactive

IV.2.3. Interprétations des résultats

D’après les résultats de simulation nous constatons que :

Des pics de courants apparaissent au niveau du stator et du rotor de la MADA, les pics au niveau du stator sont dus à la variation de la tension du réseau. Cette dernière va provoquer un transitoire au niveau des courants statoriques qui seront transmis au rotor par effet de couplage électromagnétique. Les courants au niveau du rotor et du stator ne cessent pas d’augmenter, ceci est dû à la commande des puissances qui vont donner une référence de tension rotorique plus importante qu’avant pour compenser le manque de puissance causé par la diminution de la tension du réseau (Fig.IV-3 et Fig.IV-4).

L’augmentation des courants rotoriques va provoquer un excès de courant au niveau des convertisseurs statiques (CCR, CCM) qui vont provoquer à leur tour l’augmentation de la tension du bus continu. Cela va engendrer le claquage de condensateur et une surcharge thermique au niveau des convertisseurs statiques qui sont dimensionnés à seulement 30% de la puissance nominale (Fig.IV-5).

Au moment du creux de tension, nous remarquons une diminution de la valeur moyenne du couple électromagnétique développé par la machine qui se traduit par une augmentation de la vitesse. À l’établissement de la tension, une valeur très importante de couple électromagnétique sera observée au niveau de la machine provoquant ainsi une perturbation de vitesse (Fig.IV-6).

Durant le creux de tension la puissance statorique active diminue par effet de diminution de la tension. au rétablissement de la tension la puissance active retrouvera sa valeur de référence de 3.5kW mais sera accompagné de pics et d’oscillations d’amplitudes trop importantes (Fig.IV-7).

Durant le creux de tension la MADA fournit de l’énergie réactive au réseau ceci risquerait de démagnétiser la machine. Au rétablissement de la tension la machine récupèrera à nouveau la quantité d’énergie cédée au réseau (FigIV-8).

En essayant d’évacuer le surplus d’énergie reçu par le bus continu la puissance active fournie par le CCR augmente jusqu’à atteindre les limites admissibles par le convertisseur. La puissance

réactive au niveau du CCR ne sera pas affectée par ce genre de défaut grâce à la commande qui maintient le fonctionnement du CCR à facteur de puissance unitaire (Fig IV-9).

IV.3. Recommandations des Grid codes

Les recommandations sont généralement destinées pour les fermes éoliennes de grandes capacités de production. Ces normes stipules que les fermes éoliennes doivent contribuer au contrôle du réseau électrique (notamment fréquence et tension) d'une façon similaire que les sources d'énergie conventionnelles, et impose des réglementations strictes en cas d'une anomalie sur le réseau (comme le cas de creux de tension), ces normes recommandent un comportement bien précis concernant [24]:

IV.3.1. Puissance active

Les fermes éoliennes doivent contrôler la puissance générée à la sortie et assurer une fréquence stable, ceci a pour effet de protéger les lignes de transmissions contre la surcharge et minimise l'effet de forte variation de la vitesse du vent. (Des maximums de rampes, des changements de consigne de puissances peuvent être imposés aux aérogénérateurs).

IV.3.2. Puissance réactive

Les fermes éoliennes doivent contrôler l'énergie réactive échangée et fonctionner dans un intervalle de $\cos \phi = 0.9$ arrière et $\cos \phi = 0.98$ en avance.

IV.3.3. Les marges de fréquences de fonctionnement

Les fermes éoliennes doivent fonctionner dans un intervalle de fréquence situé entre 49.5Hz et 50.5Hz.

IV.3.4. Comportement durant le creux de tension

Les « grid code » recommandent que les aérogénérateurs doivent faire face à des creux de tensions d'un certain pourcentage rapporté à la tension nominal du réseau pour une durée bien spécifiée, de telles contraintes sont connues sous le nom de FRT ou bien LVRT, ils sont décrit par des caractéristiques de la tension ($V=f(t)$) démontrant l'immunité minimale du système face à un creux d'une profondeur et d'une durée bien connus.

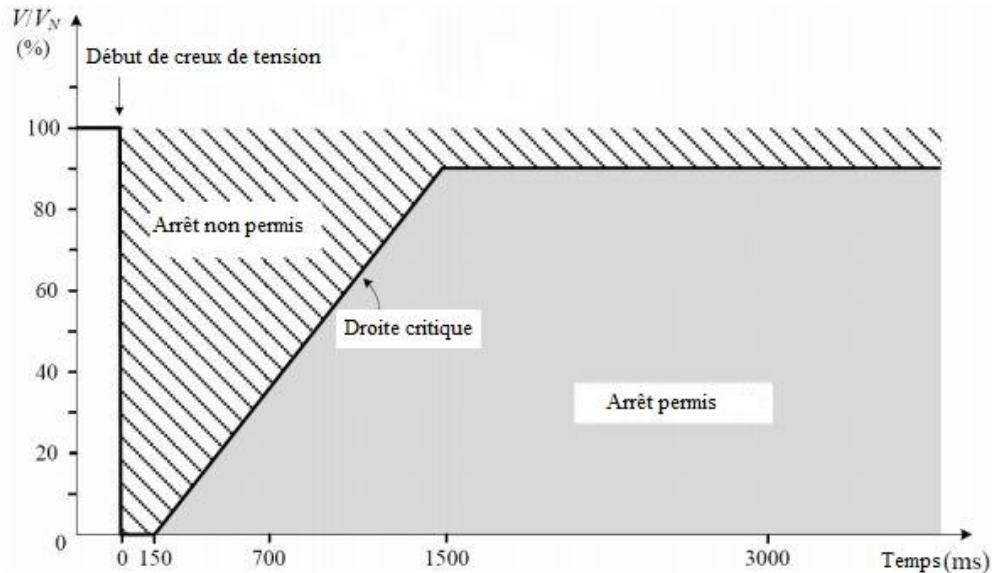


Figure IV -10: Recommandation du Grid code pour le LVRT [24]

IV.4. Protection de la MADA durant le creux de tension

Le ‘Grid Code’ impose aux aérogénérateurs de rester connecté au réseau durant le creux de tension pour une durée spécifiée avant d’avoir la permission de déconnecter, pour cela il faut utiliser des technologies de protection pour que la MADA reste connectée au réseau sans l’endommager.

IV.4.1. Technique de protection durant le creux de tension

Plusieurs techniques existent dans la littérature qui traite des problèmes de creux de tension, deux approches majeures sont utilisées [29] :

IV.4.1.1. Méthodes passives

- Pitch control : Cette méthode consiste à contrôler l’angle de calage des pales lors d’un creux de tension, ce système sert à limiter l’énergie mécanique reçue par la turbine éolienne en changeant l’angle d’incidence. Ceci a pour effet d’atténuer les phénomènes transitoires remarquables lors du défaut.
- ESS systems : Cette méthode consiste à installer un dispositif de stockage d’énergie qui permet d’absorber l’énorme quantité d’énergie libérée au moment de défaut. Nous utilisons généralement des accumulateurs à base de cellules d’électrolytes ou bien une nouvelle technologie connue sous le nom de « super capacitors ». Ces accumulateurs sont installés généralement entre les deux convertisseurs qui lient le rotor de la machine au réseau [32].
- Protection par crowbar : C’est une méthode classique, simple à implémenter, et moins coûteuse qui assure la protection de la MADA durant le creux de tension. Plusieurs configurations de crowbar existent, nous allons détailler dans la suite de ce mémoire quelques techniques en présentant leurs avantages et inconvénients [19, 21, 22].

IV.4.1.2. Méthodes actives

Ces techniques proposent une combinaison de systèmes de protection comme le crowbar et des techniques de commande avancée, l’idée consiste à ajouter des retours d’état supplémentaire et termes de compensation en utilisant des régulateurs classique de type PI pour le contrôle, ces techniques

visent à minimiser l'impact du creux de tension sur le transitoire qui apparaît sur l'ensemble de la machine et les convertisseurs statiques [32].

IV.4.1.3. Méthodes actives avancées

Contrairement aux méthodes passives ces méthodes ne requièrent aucun dispositif supplémentaire, l'idée est de synthétiser une loi de commande pour les convertisseurs statiques quel que soit les conditions du réseau. Ces méthodes utilisent généralement des techniques d'intelligence artificielle, citons : la régulation par logique floue [29].

Dans cette partie, nous donnons un aperçu sur les techniques de protection par crowbar qui existent dans la littérature, des résultats de simulation sont associés à chaque technique.

IV.4.2. Crowbar avec résistance rotorique et détection par critère de tension

La Figure IV-11 illustre le principe de protection de la MADA par insertion de résistance supplémentaire au niveau du rotor, ces résistances additionnelles jouent le rôle d'amortisseurs pour limiter les transitoires des courants durant le creux de tension.

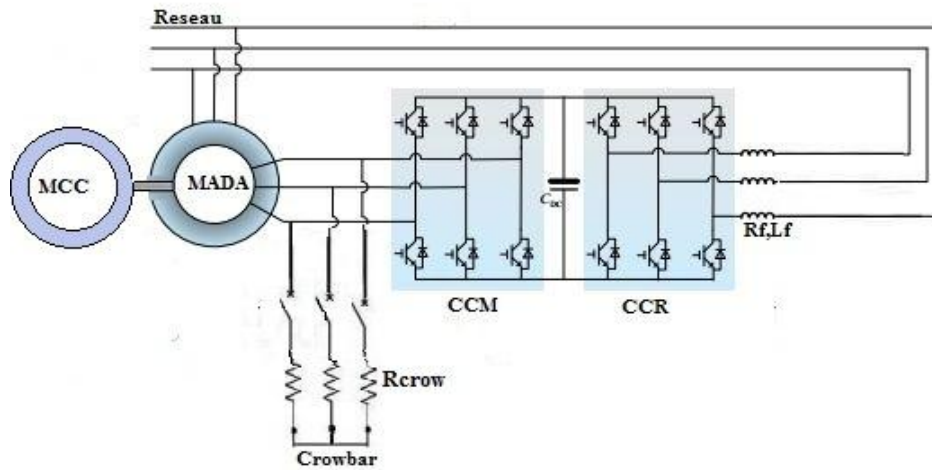


Figure IV -11: Schéma de principe de protection par crowbar [14]

L'organigramme présenté dans la figure IV-12 montre le principe de détection d'un défaut sur le réseau et le déclenchement du crowbar.

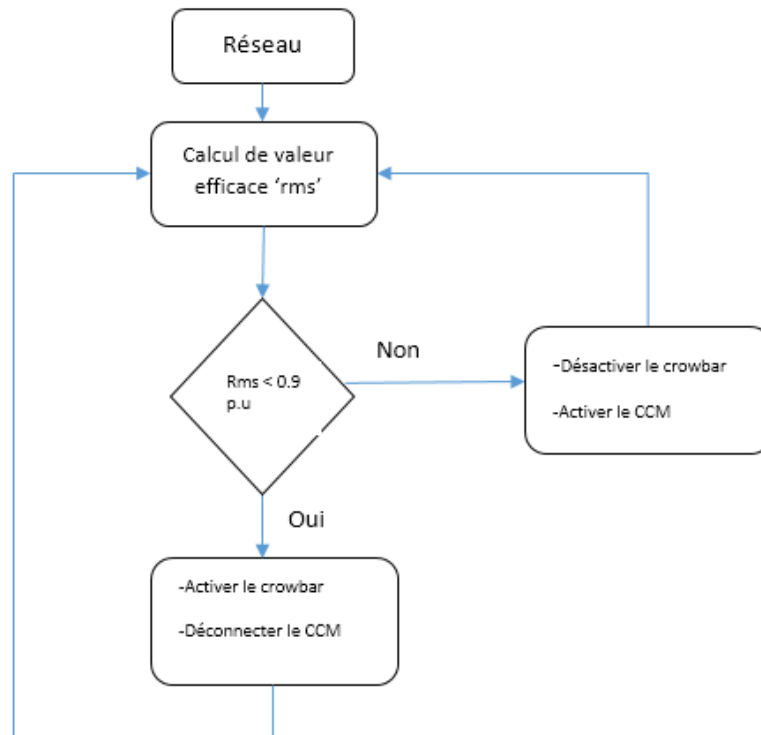


Figure IV -12: Organigramme illustrant la technique de commande de crowbar

Un comparateur de tension est utilisé pour renvoyer la valeur efficace de la tension. Nous trouvons des circuits similaires à celui rencontrés sur les multimètres numériques, le calcul de la valeur efficace de la tension s’effectue sur un intervalle de 10ms, à chaque fois la valeur efficace est comparée à la valeur nominale de la tension de réseau, une fois nous détectons une diminution de plus de 10% le crowbar est activé et le convertisseur côté machine (CCM) est déconnecté.

IV.4.2.1. Simulations

Nous présentons les résultats de simulation d’un creux de tension de 80% et d’une durée de 500ms pour des différentes valeurs de résistances de crowbar.

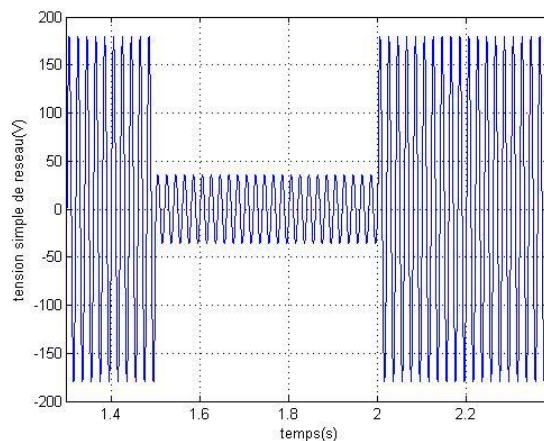
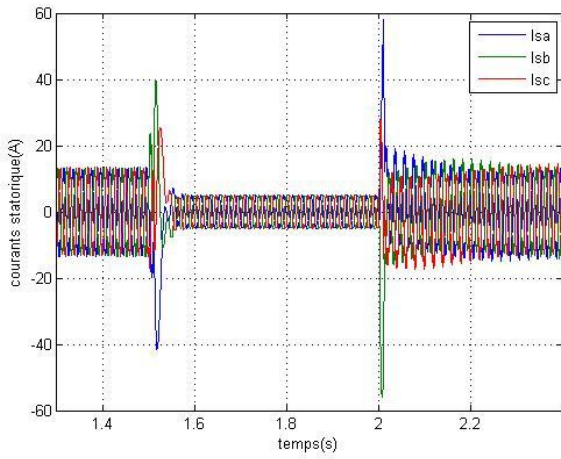
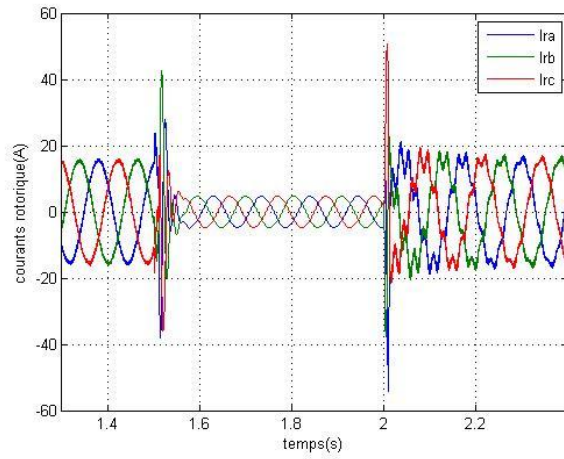


Figure IV -13: Creux de tension de 80%

- **Résistance Crowbar = Résistance rotorique ($R_{crow}=1.R_r$)**

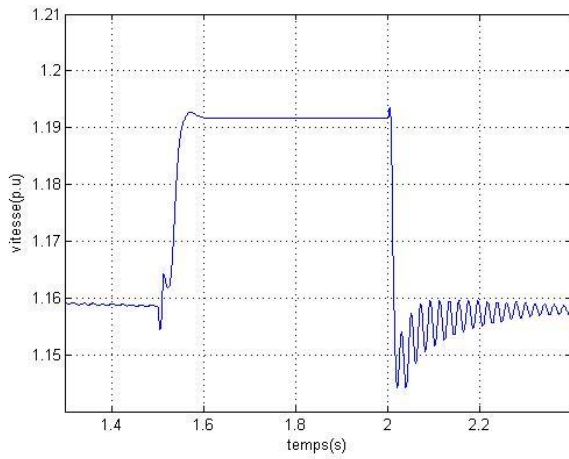


- a -

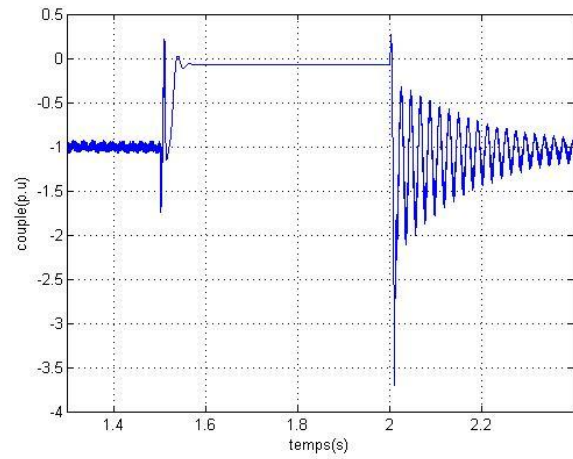


- b -

Figure IV -14: Courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar
(a) : courants statoriques, (b) : courants rotoriques

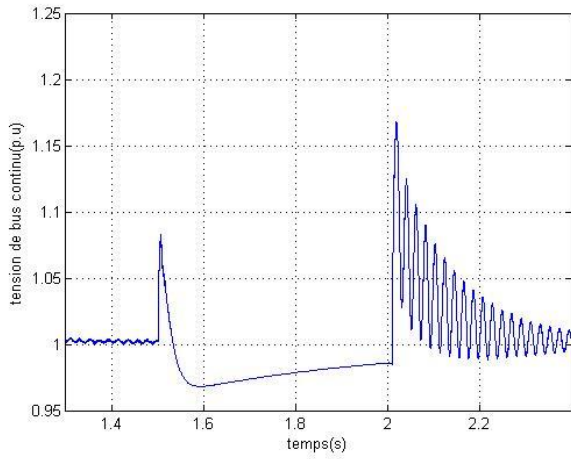


- a -

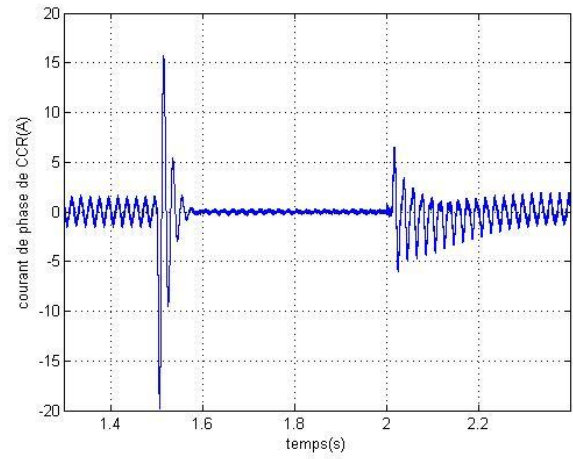


- b -

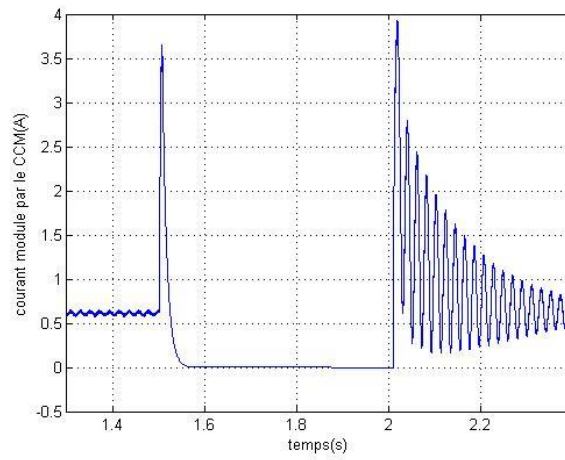
Figure IV -15: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar
(a) : vitesse, (b) : couple électromagnétique



- a -



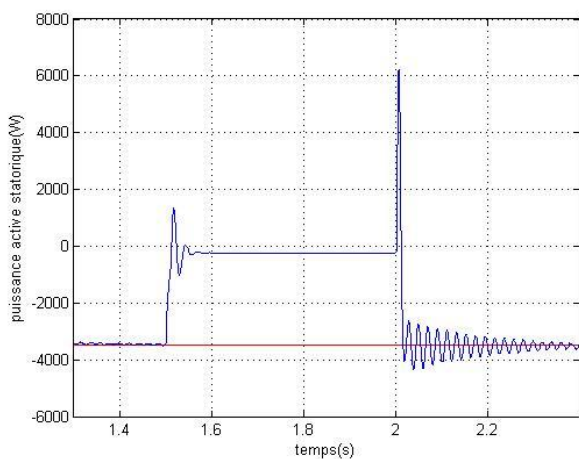
- b -



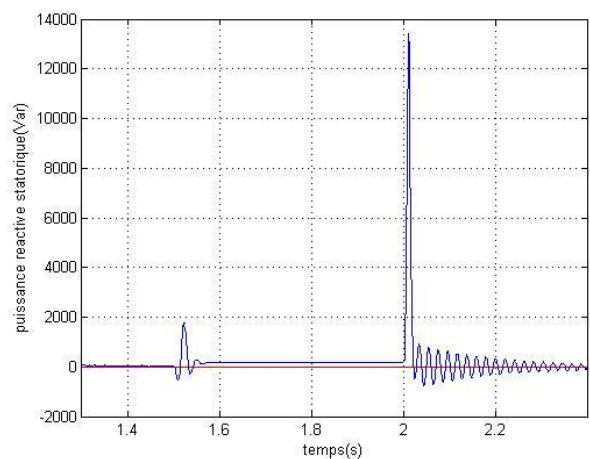
- c -

Figure IV -16: Tension de bus continu et les courants dans les convertisseurs statiques avec protection crowbar

(a) : tension du bus continu, (b) : courant modulé par le CCM, (c) : courant de phase de CCR



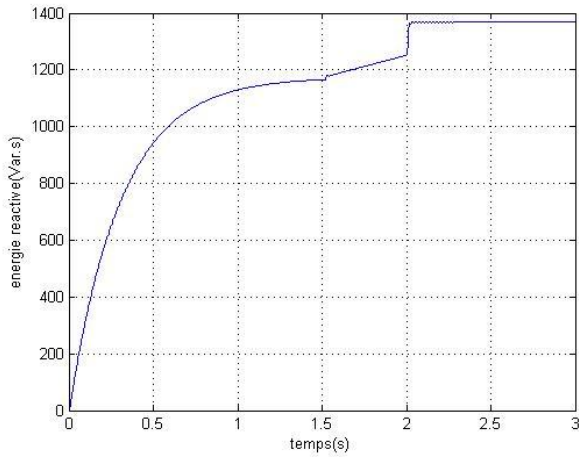
- a -



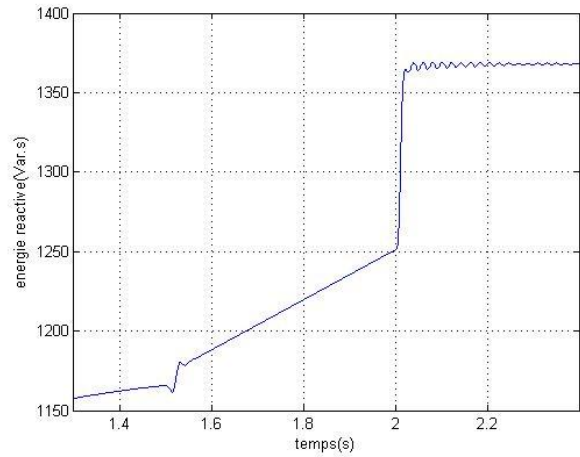
- b -

Figure IV -17: Puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar

(a) : puissance active, (b) : puissance réactive



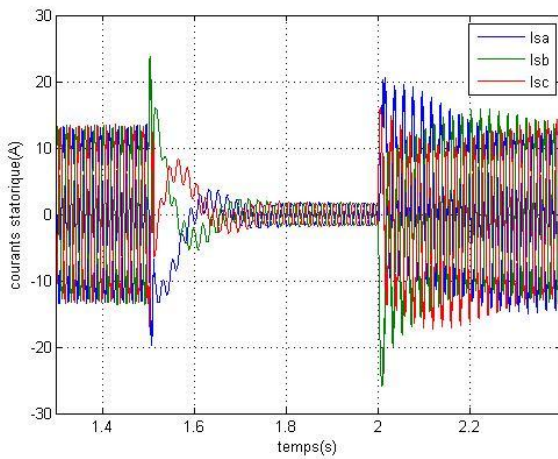
- a -



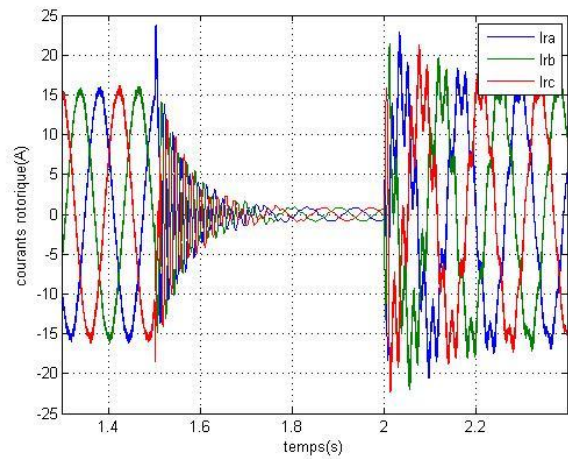
- b -

Figure IV -18: l'énergie réactive avec protection crowbar
(a): énergie réactive, (b) : zoom sur l'énergie réactive

➤ Résistance Crowbar = 10 fois la Résistance rotorique ($R_{crow}=10.R_r$)

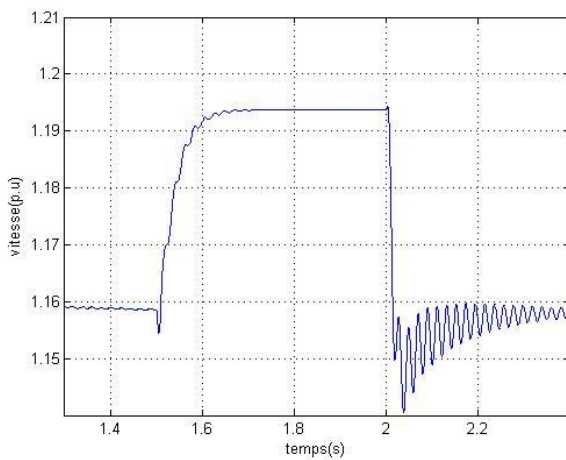


- a -

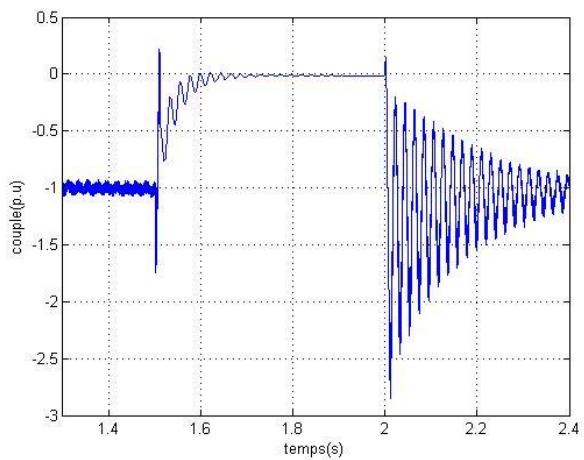


- b -

Figure IV -19: courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar
(a) : courants statoriques, (b) : courants rotoriques

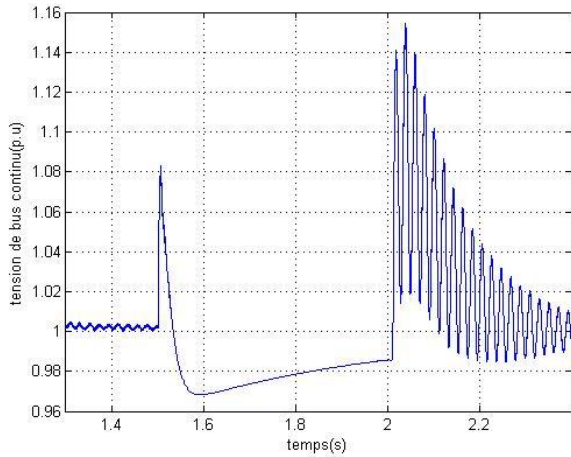


- a -

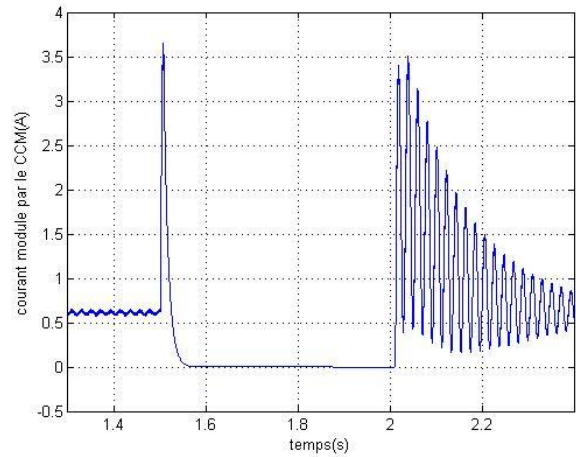


- b -

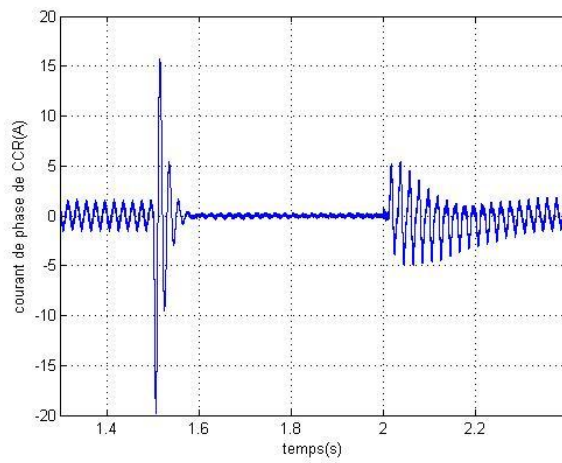
Figure IV -20: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar
(a) : vitesse, (b) : couple électromagnétique



- a -

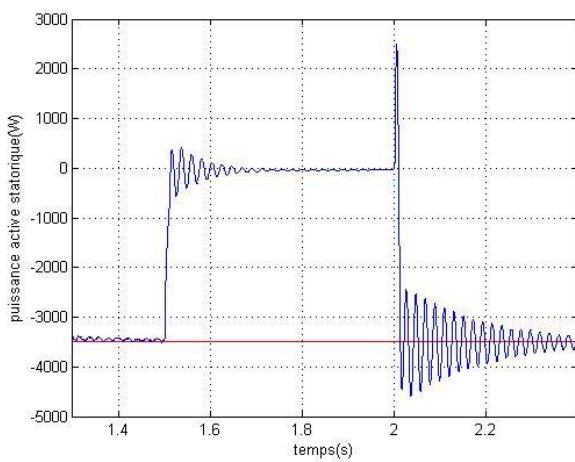


- b -

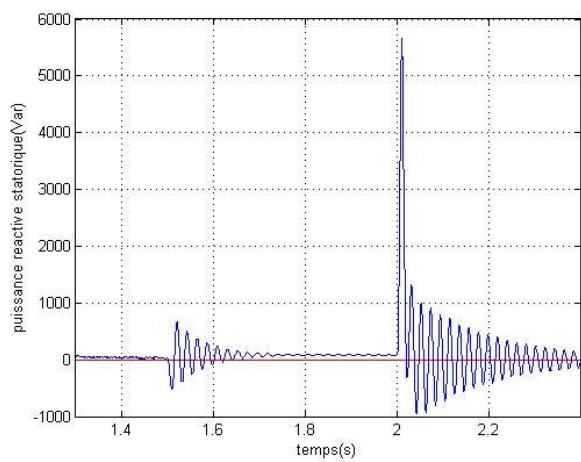


- c -

Figure IV -21: Tension de bus continu et courants des convertisseurs statiques avec protection crowbar
(a) : tension du bus continu, (b) : courant modulé par le CCM, (c) : courant de phase de CCR

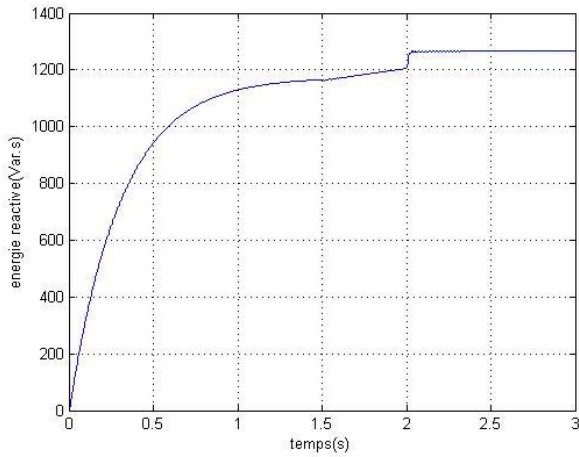


- a -

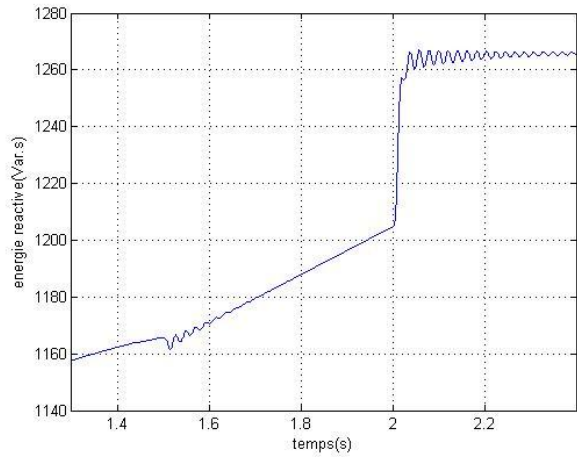


- b -

Figure IV -22: puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar
(a) : puissance active, (b) : puissance réactive



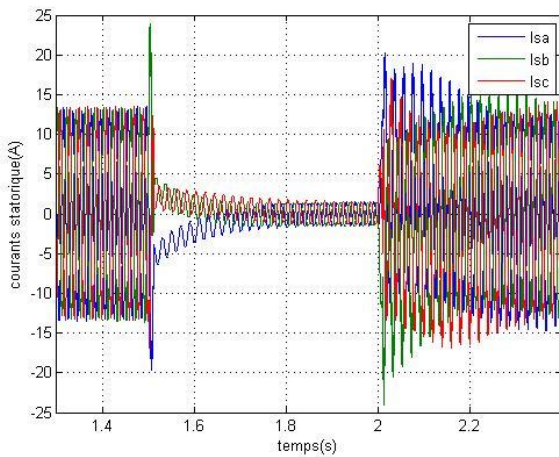
- a -



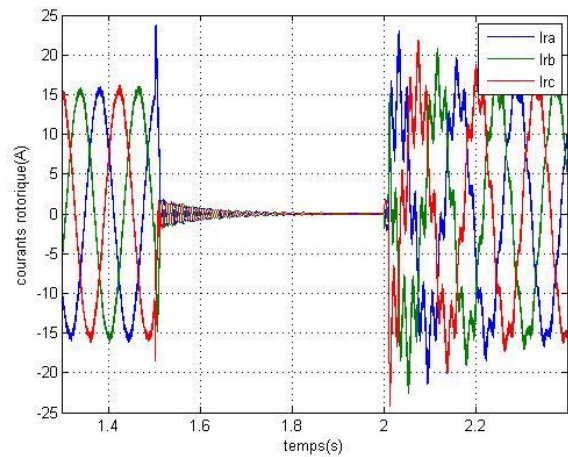
- b -

Figure IV -23: l'énergie réactive avec protection crowbar
(a): énergie réactive, (b) : zoom sur l'énergie réactive

➤ Résistance Crowbar = 100 fois la Résistance rotorique ($R_{crow}=100.R_r$)

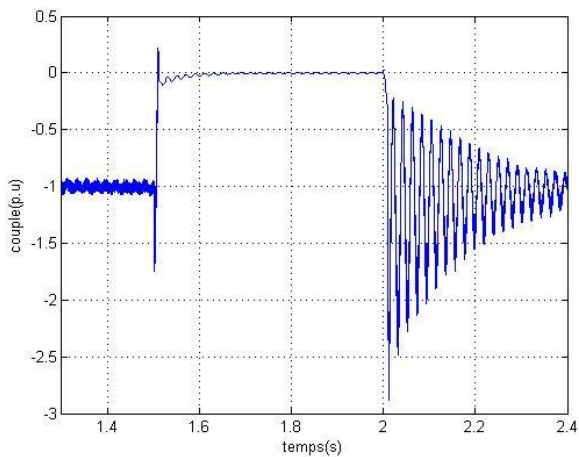


- a -

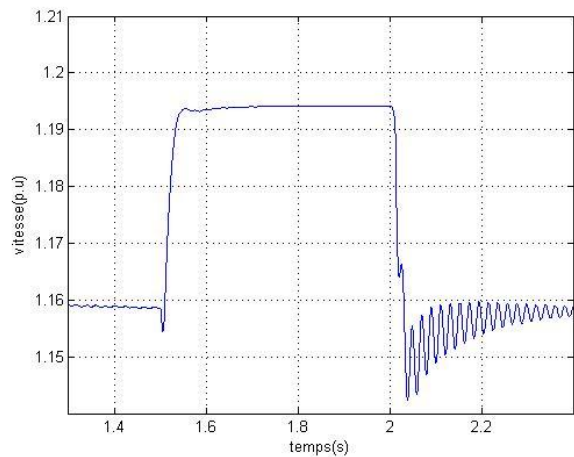


- b -

Figure IV -24: Courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar
(a) : courants statoriques, (b) : courants rotoriques



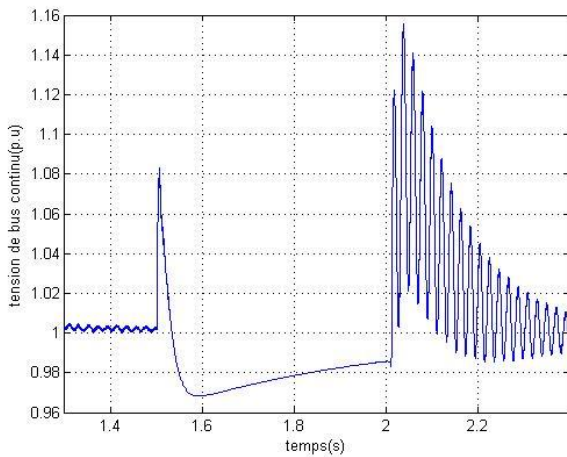
- a -



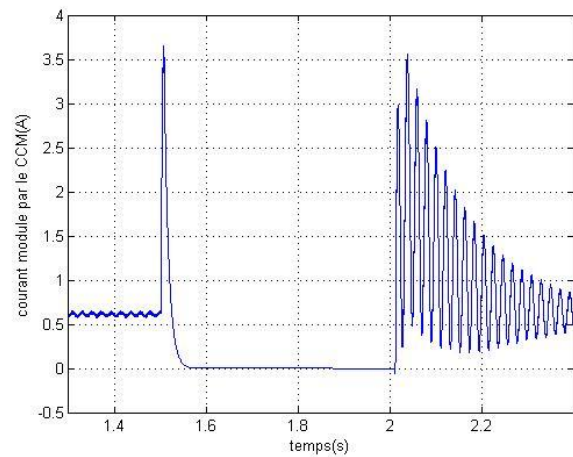
- b -

Figure IV -25: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar

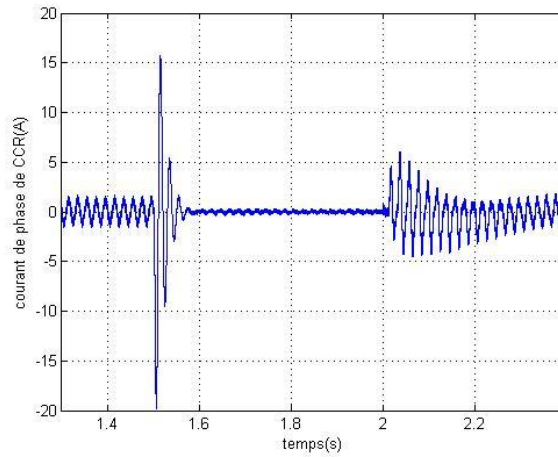
(a) : vitesse, (b) : couple électromagnétique



- a -

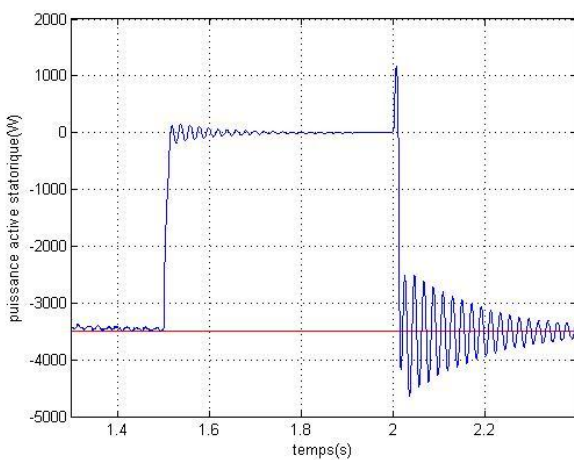


- b -

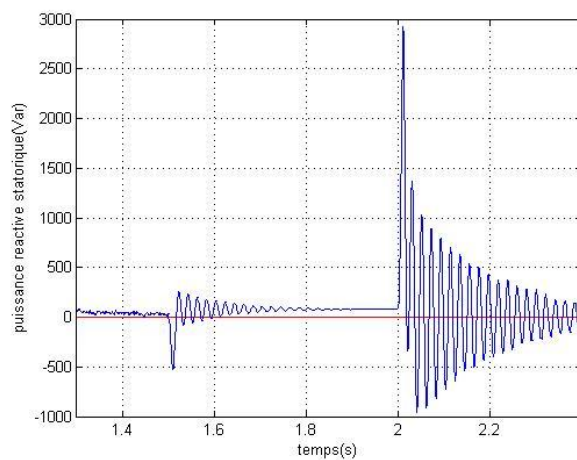


- c -

Figure IV -26: Tension de bus continu et courants des convertisseurs avec protection crowbar
(a) : tension du bus continu, (b) : courant modulé par le CCM, (c) : courant de phase de CCR

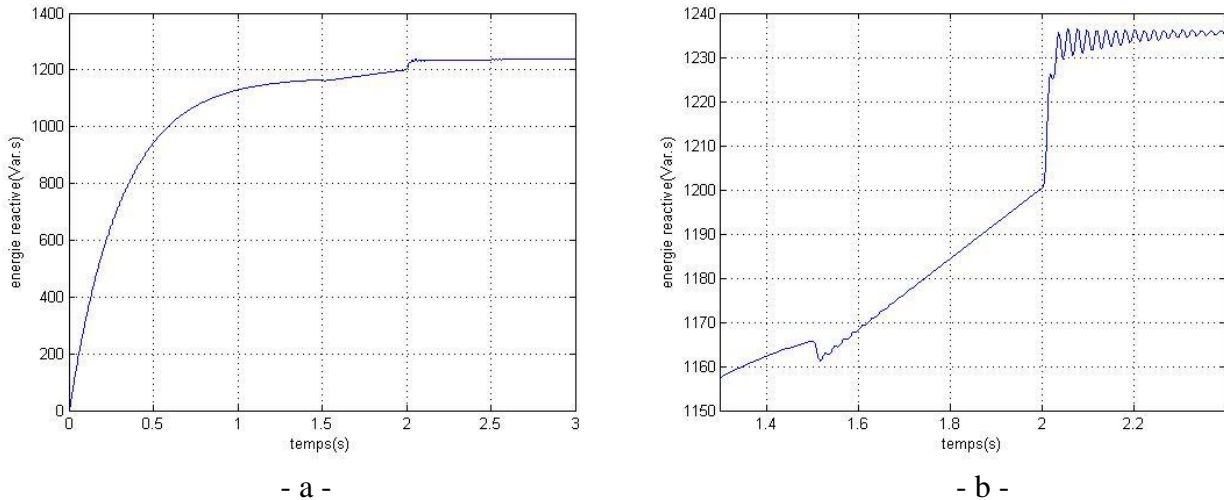


- a -



- b -

Figure IV -27: Puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar
(a) : puissance active, (b) : puissance réactive



*Figure IV -28: l'énergie réactive
(a): énergie réactive, (b) : zoom sur l'énergie réactive*

IV.4.2.2. *Interprétations des résultats*

A l'instant du défaut des pics de courants se développent au niveau des deux armatures de la machine. Après 10ms le crowbar est activé servant ainsi à réduire l'amplitude des courants qui s'atténue proportionnellement avec l'augmentation de la résistance du crowbar. Au rétablissement de la tension, des pics de courants apparaissent au rotor et au stator de la machine, en choisissant une résistance de crowbar assez importante nous contribuons à l'atténuation de ces pics au retour de la tension (Fig.IV-14, Fig.IV-19, FigIV-24)

L'insertion du crowbar a pour effet d'amener la valeur du couple électromagnétique à une valeur très réduite, ceci est une conséquence directe de la diminution des courants statoriques et rotoriques provoquant l'augmentation de la vitesse de la MADA. Un transitoire assez important du couple électromagnétique est attendu à la désactivation du crowbar (Fig.IV-15, Fig.IV-20, Fig.IV-25).

L'enclenchement du crowbar offre une isolation des convertisseurs de l'électronique de puissance du rotor de la machine qui est le siège d'une importante augmentation des courants. Seulement quelques pics passent vers les convertisseurs, ceci est dû essentiellement au temps mort qui s'évalue à 10ms avant l'activation du crowbar et 10ms après la désactivation du crowbar. Ces pics qui passent vers les convertisseurs d'électronique de puissance provoquent une légère augmentation de la tension de bus continu et des pics de courte durée au niveau du CCM et CCR (Fig.IV-16, Fig.IV-21, Fig.IV-26)

L'augmentation de la résistance du crowbar réduit considérablement la puissance active fournie par la MADA durant le défaut, ceci est considéré comme le seul inconvénient de l'augmentation de la résistance du crowbar. Cependant une résistance assez importante du crowbar réduit considérablement la puissance réactive pompée du réseau réduisant ainsi l'énergie consommée durant le creux de tension (Fig.IV-17, Fig.IV-22, Fig.IV-27).

IV.4.2.3. *Etude de l'influence de l'instant de l'apparition du creux et au rétablissement de la tension sur la MADA*

Dans cette partie nous présentons une étude comparative de l'évolution du courant, couple et de la puissance active délivrée par la machine à l'instant de l'apparition du défaut et au rétablissement de la tension.

Dans une première partie nous relevons le maximum de grandeurs citées ci-dessus pour les différents instants d'apparition du défaut, ensuite nous procédons d'une façon similaire mais cette fois ci pour l'instant de rétablissement de la tension. Nous terminons par une étude de l'influence de la valeur de résistance du crow bar sur l'évolution de ces grandeurs.

a. Influence de l'instant du creux de tension

Nous présentons dans cette partie les résultats de simulation d'un creux de tension d'une durée de 200ms et d'une profondeur de 80%. Nous traçons pour les différents instants d'apparition de défaut les maximums des courants, de puissance active et de couple qui seront développés par la machine durant le creux de tension. La résistance du crow bar a été fixée à 10 fois la résistance rotorique.

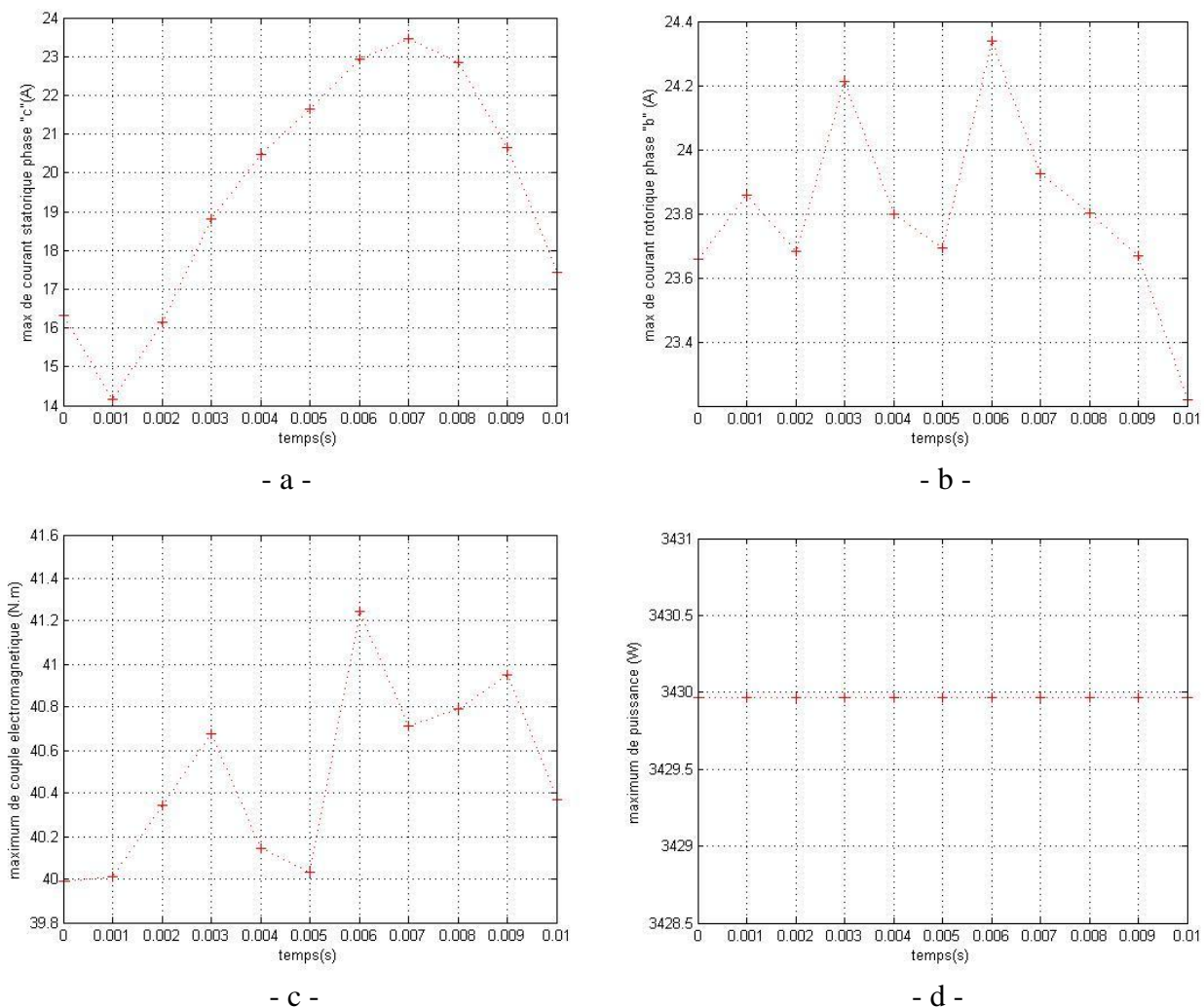


Figure IV -29: Evolution des pics des grandeurs de la MADA en fonction de l'instant du défaut
 (a) : courant statorique, (b) : courant rotorique,
 (c) : couple électromagnétique, (d) : puissance active

b. Influence de l'instant de rétablissement de la tension après la disparition du creux

Nous procédons de la même manière que dans la première partie mais cette fois ci en changeant l'instant de rétablissement de la tension.

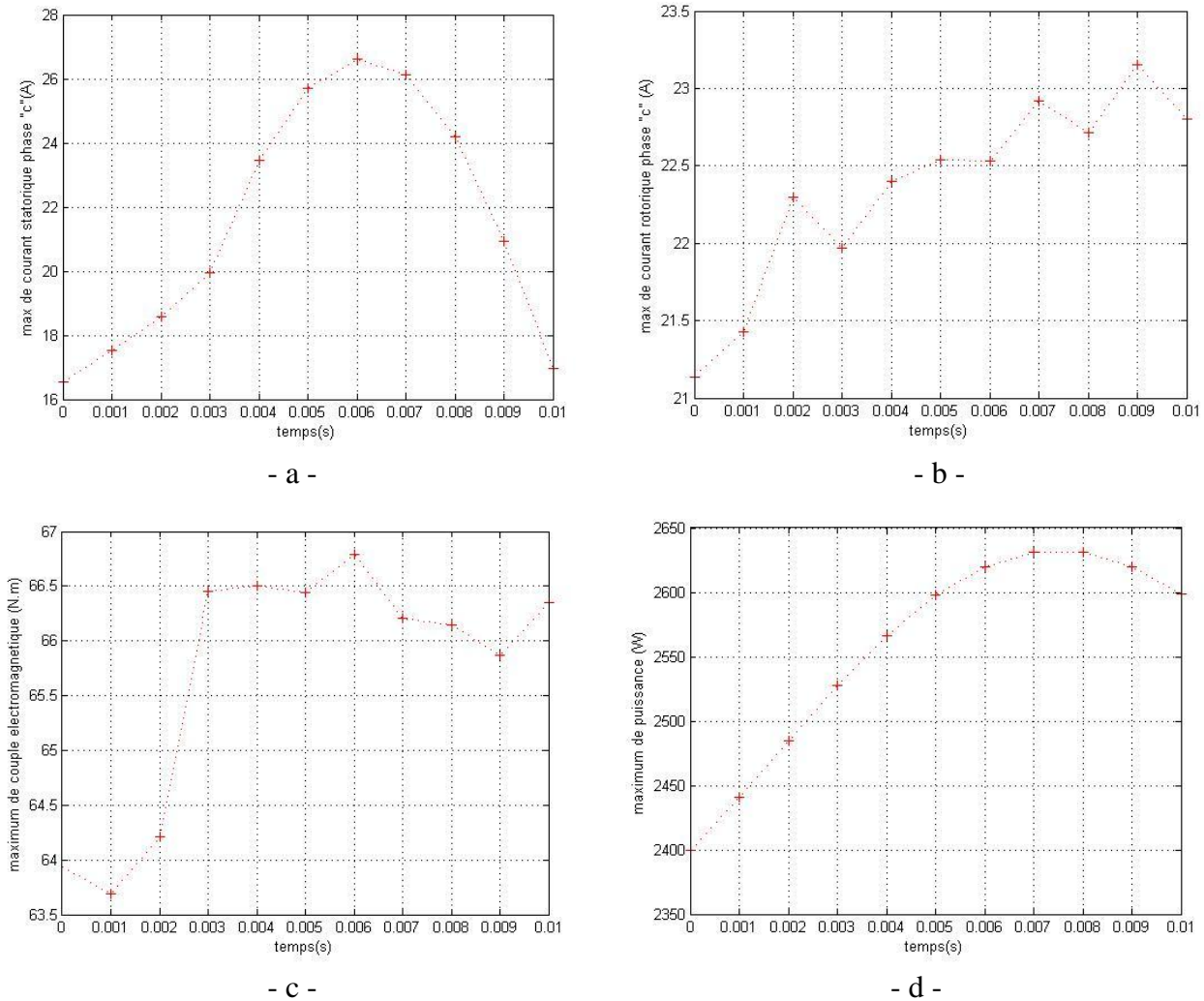


Figure IV -30: Evolution des pics des grandeurs de la MADA en fonction de l'instant du rétablissement de la tension

(a) : courant statorique, (b) : courant rotorique, (c) : couple électromagnétique, (d) : puissance active

➤ Interprétations des résultats

Nous remarquons que la valeur des pics de courants développés au niveau du stator de la MADA a une relation directe avec l'instant du défaut ou bien de celui du rétablissement de la tension (Fig.IV-29/30). En effet l'apparition d'un défaut au moment où la tension passe par sa valeur crête à un effet différent de celui du passage par zéro de la tension.

Comme le rotor de la MADA n'est pas directement lié au réseau nous obtenons les mêmes résultats que pour les courants statorique, les perturbations au niveau du stator sont transmises au rotor par effet de couplage électromagnétique.

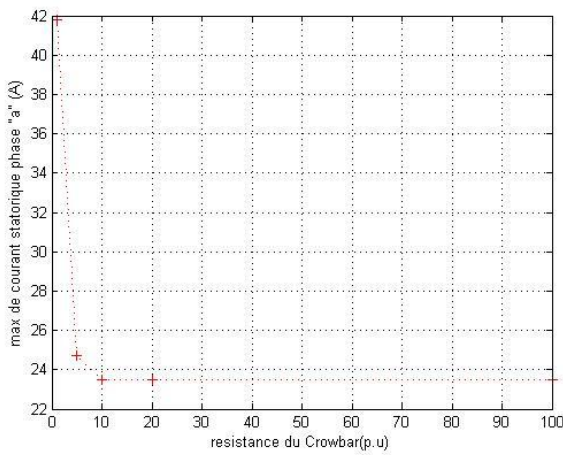
Le couple électromagnétique développé par la MADA varie peu en fonction de l'instant du défaut (entre 40N.m et 41N.m) et (entre 64N.m et 66N.m) au rétablissement de la tension.

c. Influence de la valeur de la résistance du crow bar

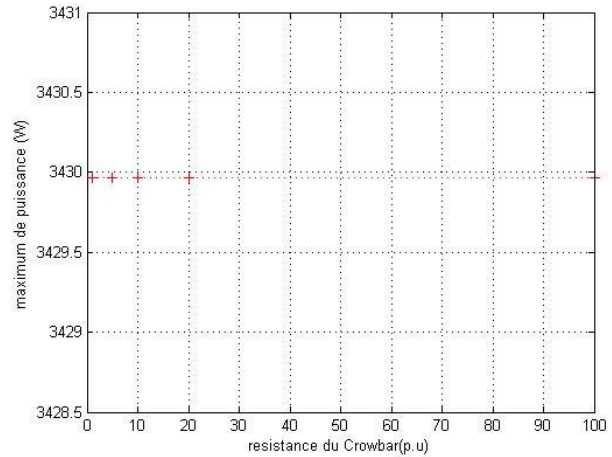
Dans cette partie nous étudions l'influence de la résistance du crow bar sur l'évolution des courants, du couple et de la puissance.

Nous présentons ci-dessous les résultats des simulations pour les différentes valeurs des résistances du crow bar.

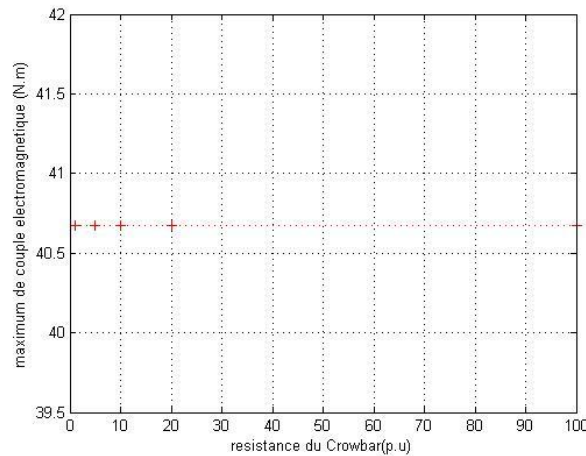
➤ A l'instant du creux de tension



- a -



- b -

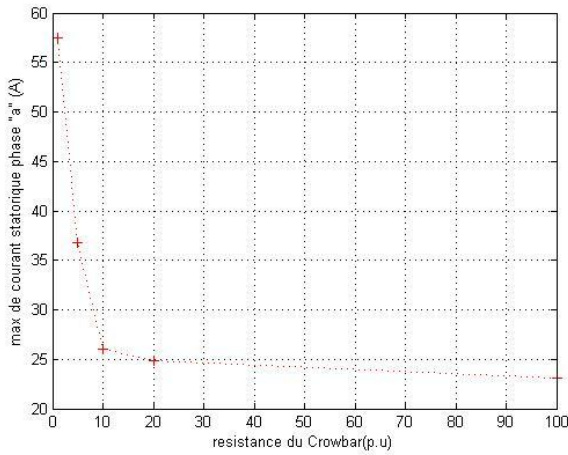


-c-

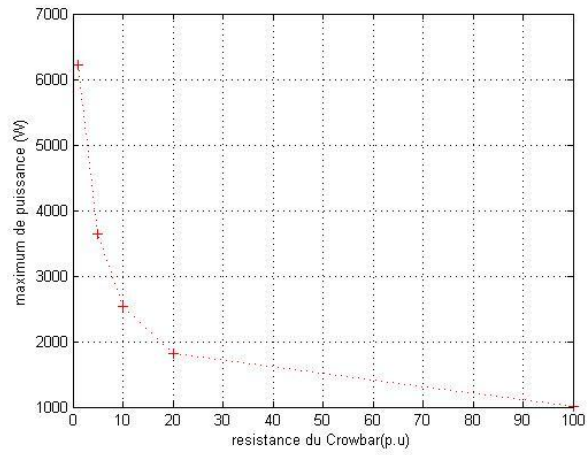
Figure IV-31: Evolution des pics des grandeurs de la MADA en fonction de la résistance d'amortissement à l'instant du creux de tension

(a) : courant statorique, (b) : puissance active, (c) : couple électromagnétique

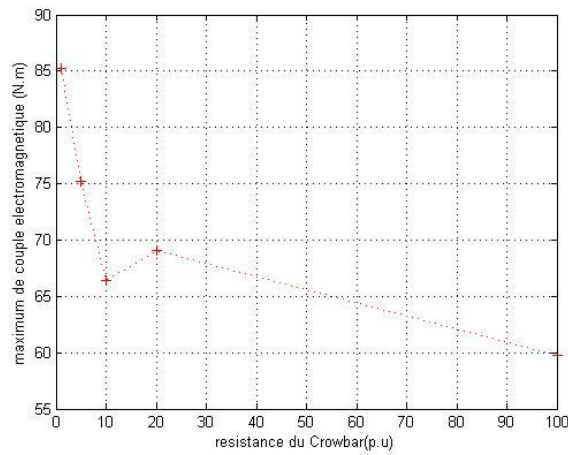
➤ Au rétablissement de la tension



- a -



- b -



- d -

Figure IV -32: Evolution des pics des grandeurs de la MADA en fonction de la résistance d'amortissement à l'instant du creux de tension
 (a) : courant statorique, (b) : puissance active, (c) : couple électromagnétique

➤ Interprétations :

L'augmentation de la résistance du crowbar contribue à l'affaiblissement des pics de courant rencontrés au niveau de la machine lors d'un creux de tension, la valeur du pic de courants passe de 58A pour une valeur de la résistance du crowbar trop faible (une fois la résistance rotorique) jusqu'à 26A pour les valeurs élevées (à partir de 20 fois la résistance rotorique). Nous remarquons qu'il est inutile d'utiliser une résistance du crowbar supérieure à 20 fois la résistance rotorique

Des résultats similaires sont obtenus pour le couple et la puissance, ces derniers diminuent avec l'augmentation de la résistance du crowbar.

IV.4.3. Crowbar hybride

Dans cette partie nous proposons une amélioration de la technique de la protection par crow bar présentée en IV.4.2. Cette nouvelle méthode repose sur l'ajout des résistances d'amortissement statorique supplémentaires (Fig.IV-33). Ceci a pour objectif de diminuer le transitoire des courants statorique durant le creux de tension et après le rétablissement de la tension [30].

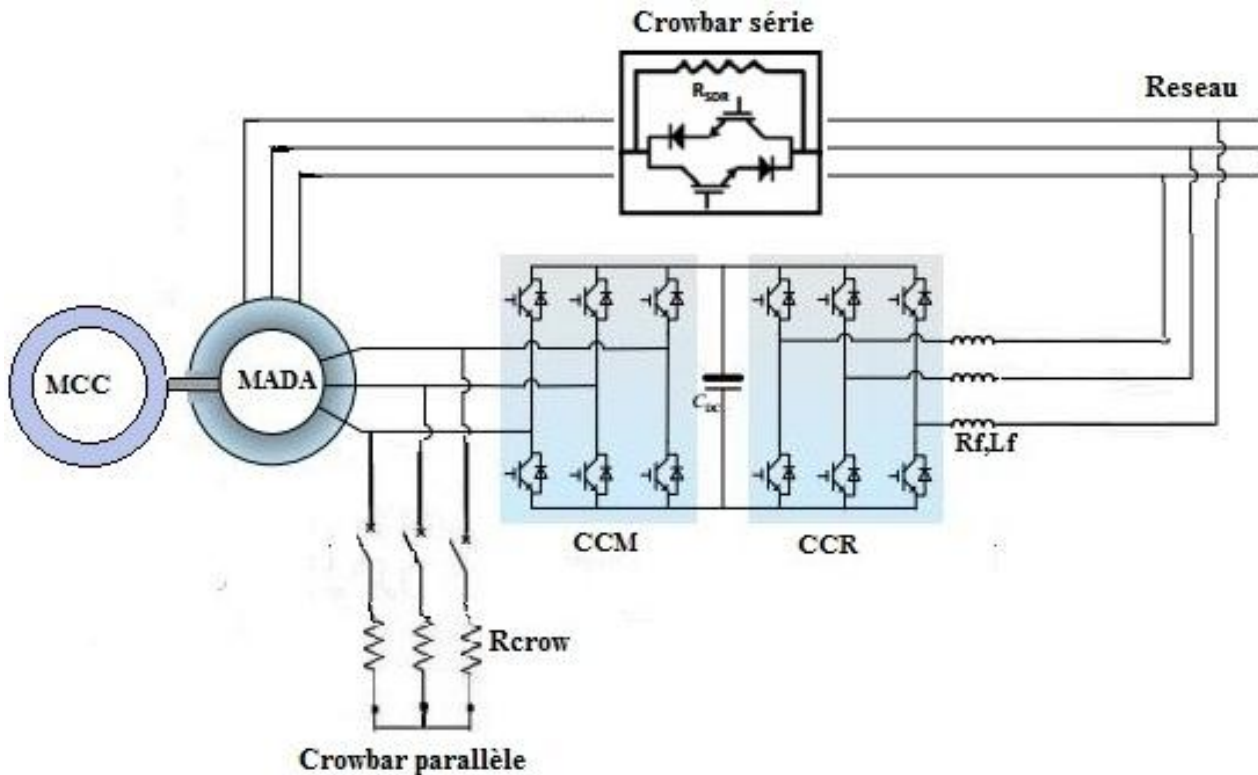


Figure IV -33: Schéma de principe du crowbar hybride

La méthode choisie consiste à utiliser deux types de crow bars, le premier est de type parallèle est détaillé en IV.4.2 (crowbar en parallèle avec le rotor) et le deuxième est de type série. Au niveau de chaque phase statorique nous mettons une résistance d'amortissement qui est montée en parallèle avec un transistor de puissance bidirectionnel en courant et en tension (TRIAC). Ce transistor est préalablement court-circuité, au moment où le crow bar série reçoit son signal d'activation. L'ouverture du transistor oblige le courant à passer par les résistances d'amortissements.

La figure IV-34 illustre la stratégie de commande du crowbar hybride

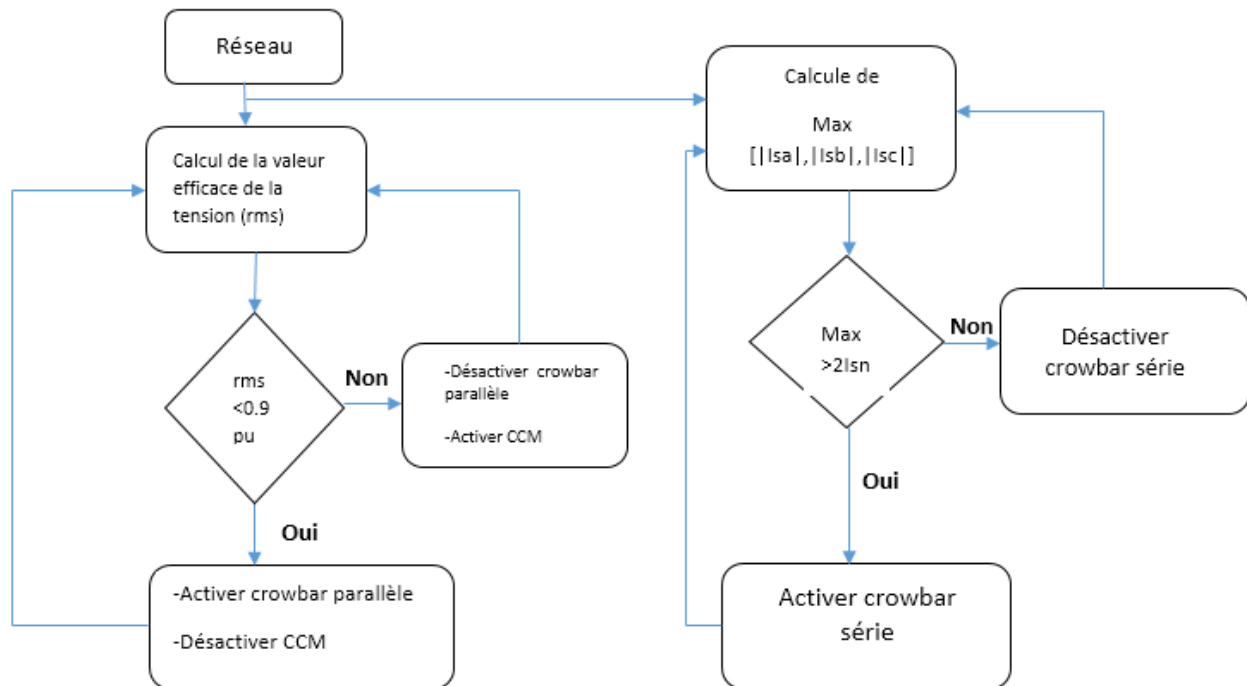
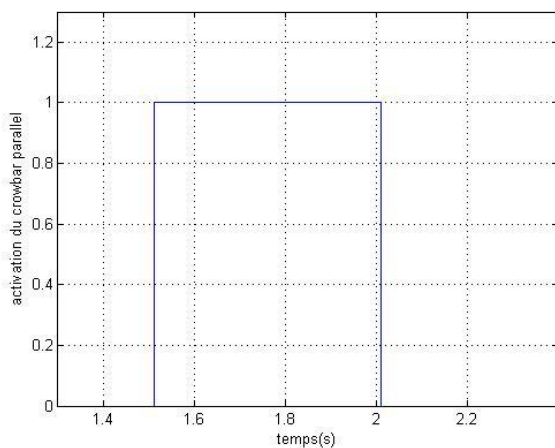
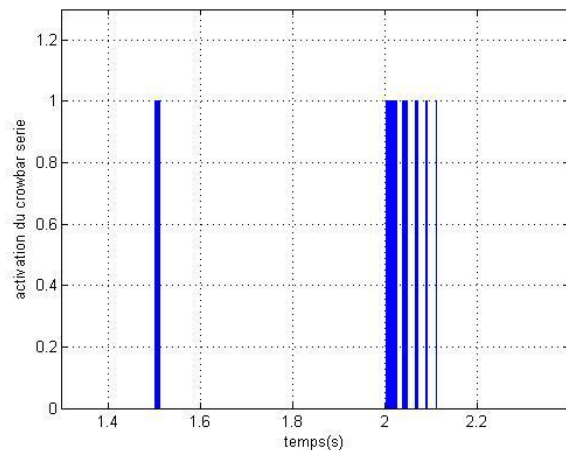


Figure IV -34: Organigramme illustrant la commande de crowbar hybride

La figure IV-35 montre les signaux d'activation du crow bar série et parallèle, nous remarquons que l'activation du crow bar parallèle dure tout au long de la durée du creux de tension. Par contre, le crow bar série s'active uniquement quand l'un des courant statorique dépasse 2p.u ayant ainsi un fonctionnement similaire à un hacheur.



- a -

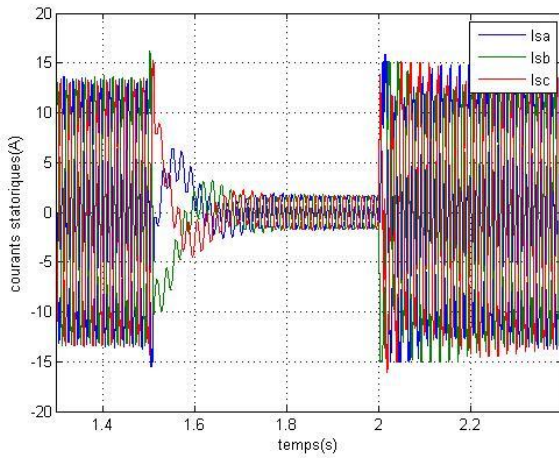


- b -

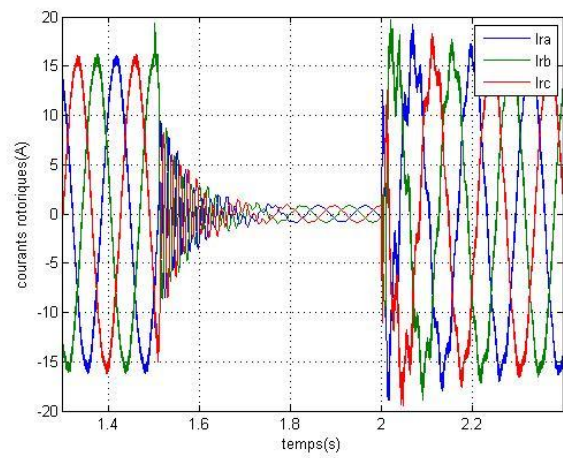
Figure IV -35: les instants d'activation des crowbars
(a): crowbar parallèle (b) : crowbar série

➤ Résultats de simulation

Nous présentons dans les figures ci-dessous les résultats de simulation d'un creux de tension d'une durée de 200ms et de profondeur de 80% pour une MADA protégée par un crowbar hybride.

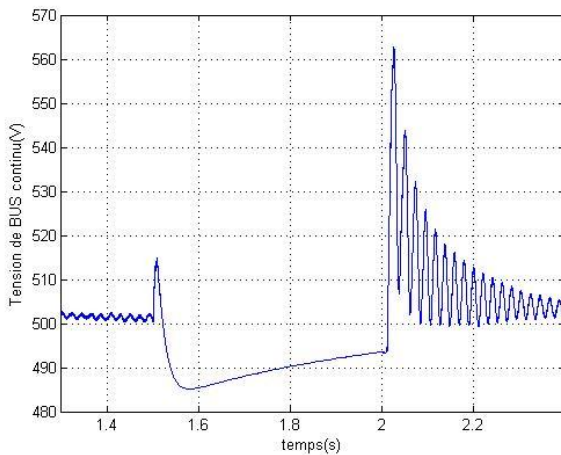


- a -

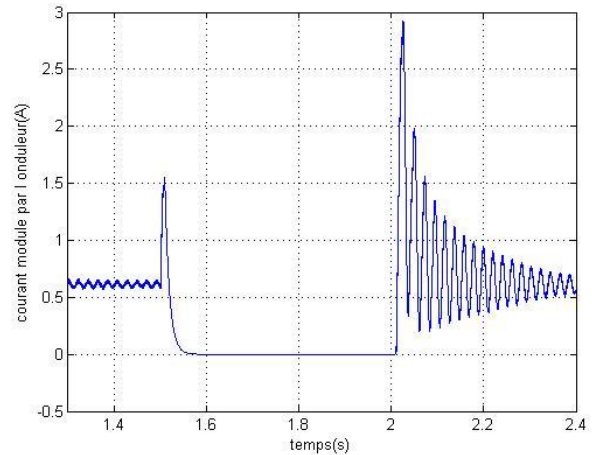


- b -

Figure IV -36: courants statoriques et rotoriques avec hybride crowbar protection
(a) : courants statorique, (b) courants rotoriques

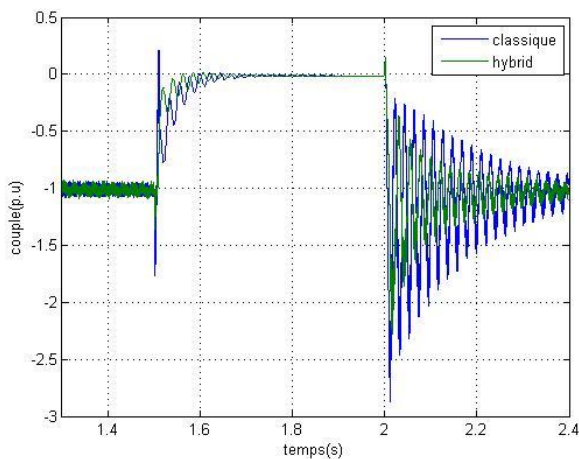


- a -

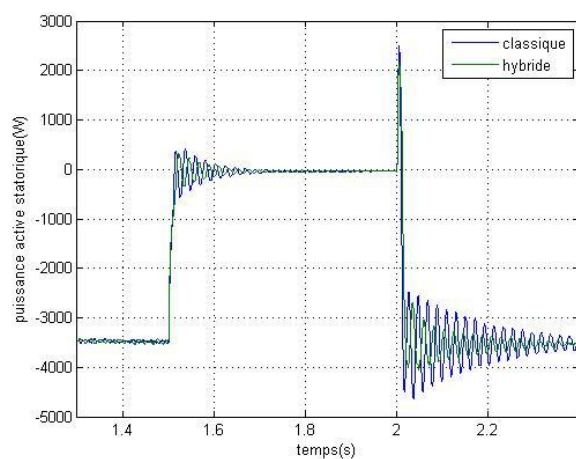


- b -

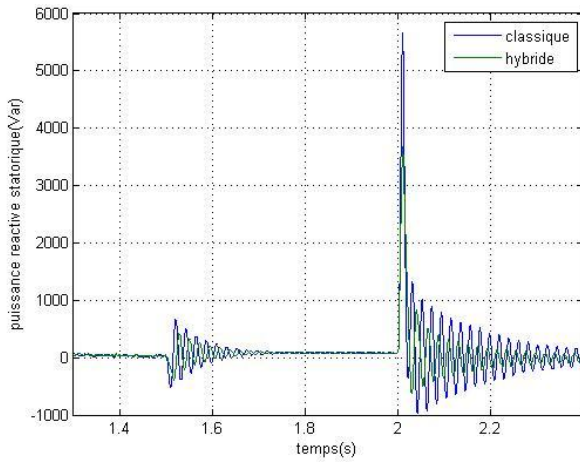
Figure IV -37: Tension du bus continu et courant modulé par le CCM avec protection crowbar
(a) : tension de bus continu (b) : courant modulé par le CCM



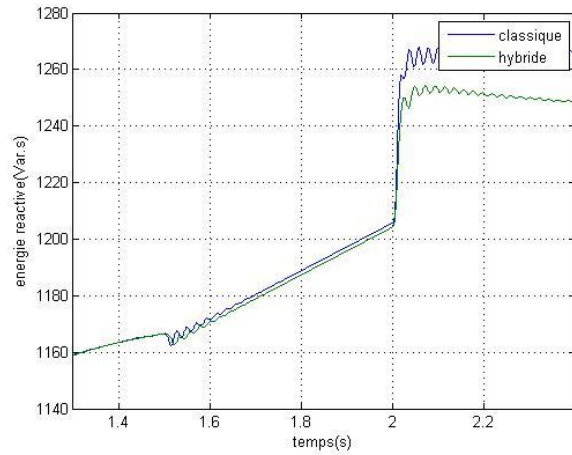
- a -



- b -



- c -



- d -

Figure IV -38: comparaison entre le crowbar classique et l'hybride
 (a) : couple électromagnétique (b) : puissance active
 (c) : puissance réactive (d) : énergie réactive

➤ Interprétations des résultats

La technique de protection de la MADA par crowbar hybride permet de protéger la MADA durant le creux de tension. La tension de bus continu est restée quasiment constante avec de pic beaucoup moins important qu'avant. Il en est de même pour le courant modulé par le CCM qui a tendance à diminuer (Fig.IV-37).

Le crowbar série permet aussi de diminuer le transitoire des courants à l' instant du défaut et au retour de la tension permettant ainsi de réduire l'enveloppe des oscillations du couple électromagnétique et d'affaiblir les pics de puissances (Fig.IV-36, Fig.IV-38).

Cette technique permet aussi de réduire le taux d'énergie réactive consommée par la machine durant le creux de tension participant ainsi au maintien de la stabilité transitoire du réseau.

IV.5. Comparaison avec le générateur à vitesse fixe

Dans cette partie nous allons s'intéresser à l'étude du régime transitoire du générateur à vitesse fixe lors de l'accrochage au réseau et pendant un creux de tension [7, 25].

Le générateur à vitesse fixe est constitué essentiellement d'une machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné (en c-c), la machine asynchrone est reliée à un banc de condensateurs qui va servir à fournir de l'énergie réactive assurant ainsi l'autoamorçage de la GAS.

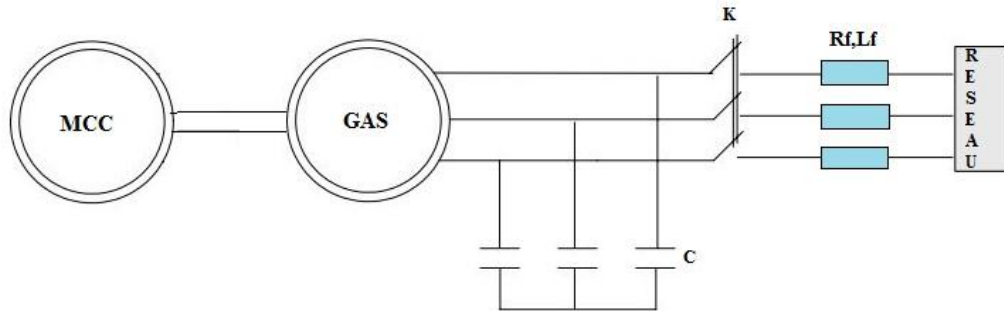


Figure IV -39: Générateur asynchrone à vitesse fixe

Nous utilisons une machine à courant continu avec un asservissement de vitesse comme dispositif d'entraînement de la génératrice.

La valeur de la capacité a été soigneusement calculée pour assurer l'autoamorçage de la GAS, en effet une valeur trop petite de la capacité ne pourra pas assurer l'autoamorçage de la GAS. Dans notre cas la valeur de la capacité a été fixée à 190uF.

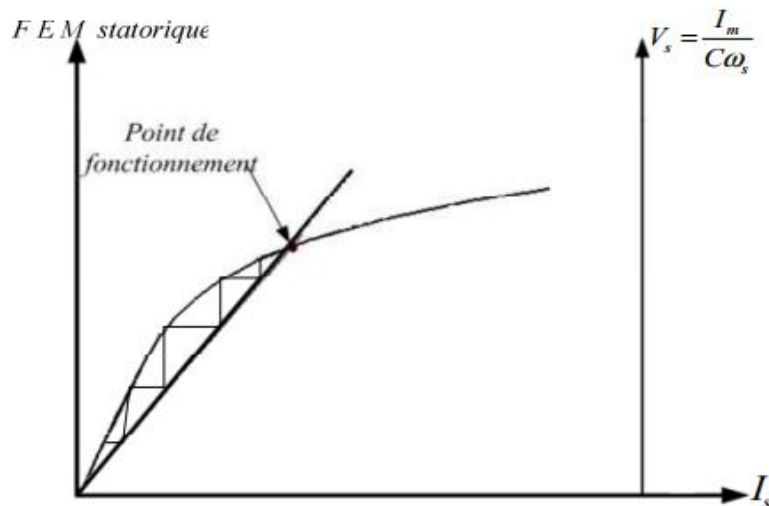


Figure IV -40: Phénomène d'autoamorçage [6]

Dans un premier temps, la génératrice asynchrone est entraînée et reçoit de l'énergie réactive de la batterie de condensateurs, une fois la tension obtenue est proche de celle du réseau nous provoquons l'accrochage du générateur au réseau. L'asservissement de la machine à courant continu servira à maintenir la vitesse de rotation constante et légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme.

A l'instant $t=2s$ nous provoquons un creux de tension d'une durée de 200ms et de profondeur de 80%.

IV.5.1. Autoamorçage du générateur à vitesse fixe

- Nous présentons les résultats des grandeurs statoriques et rotoriques en utilisant le modèle tenant compte de la saturation.

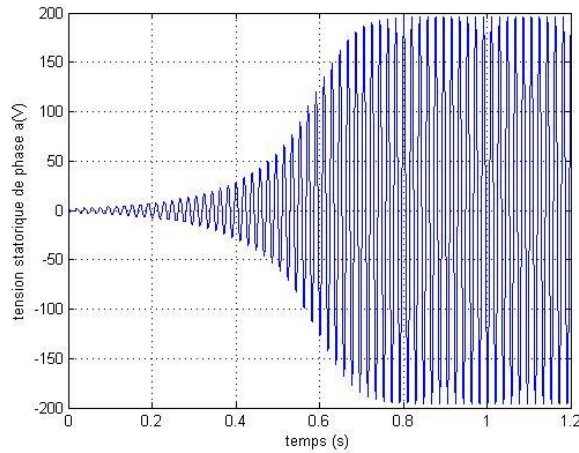


Figure IV -41: Tension d'une phase statorique à l'amorçage

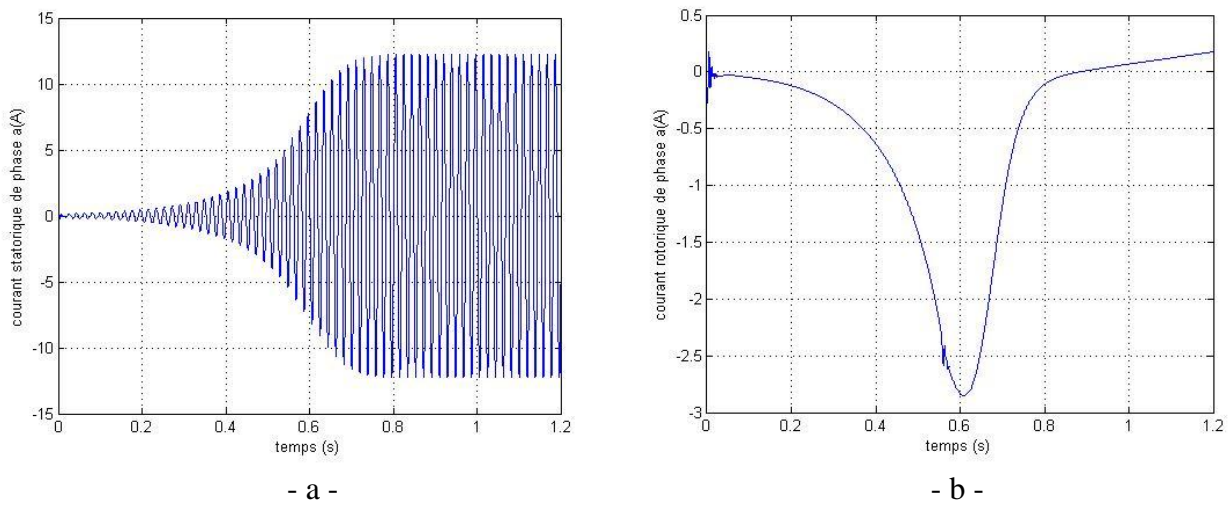


Figure IV -42: Courants statorique et rotorique à l'amorçage
(a) : courant statorique, (b) : courant rotorique

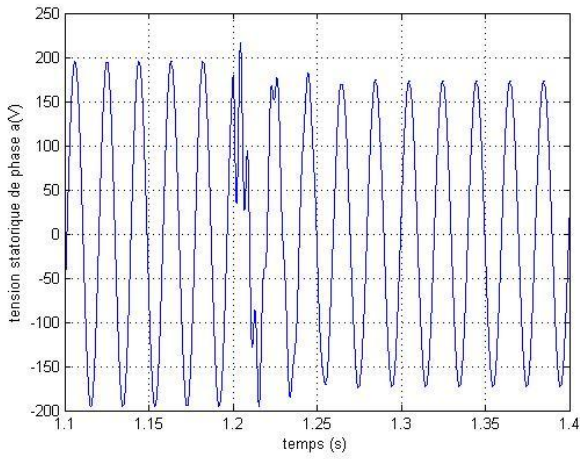
➤ **Interprétation des résultats**

Le générateur asynchrone est entraîné à une vitesse fixe et connecté aux condensateurs via son stator. À cause du flux rémanents de la machine et par effet de rotation des FEMs de rotation qui sont induites dans les bobinages de la machine provoquant ainsi la circulation de courants qui vont passer par les condensateurs et créer à leur tour une tension qui s'amplifie graduellement jusqu'à atteindre une valeur voisine de la tension de réseau (Fig.IV-41).

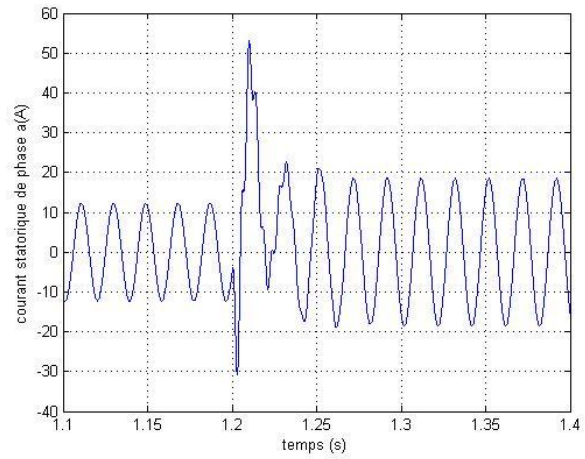
C'est dans cette partie que nous remarquons l'importance de la modélisation du phénomène de saturation. Au fur et à mesure que le courant de magnétisation augmente l'inductance magnétisante diminue assurant ainsi la limitation de flux magnétique dans la machine.

IV.5.2. Accrochage au réseau de distribution de l'énergie électrique

➤ Nous présentons les résultats de simulation des grandeurs statoriques et rotoriques ainsi que le couple et la vitesse, avec le modèle saturé.



- a -



- b -

Figure IV -43: Simulation de la tension et du courant statorique pendant l'accrochage
(a) : tension, (b) : courant

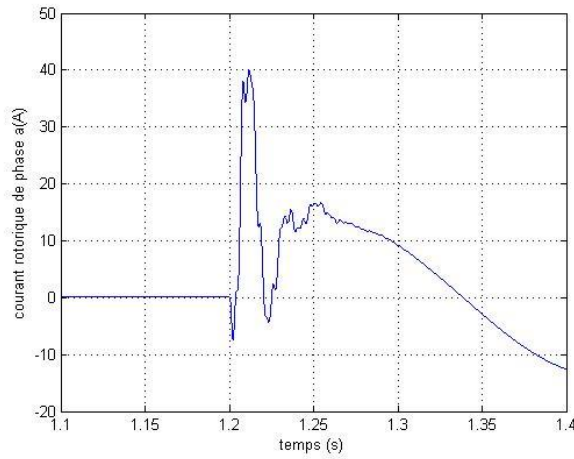
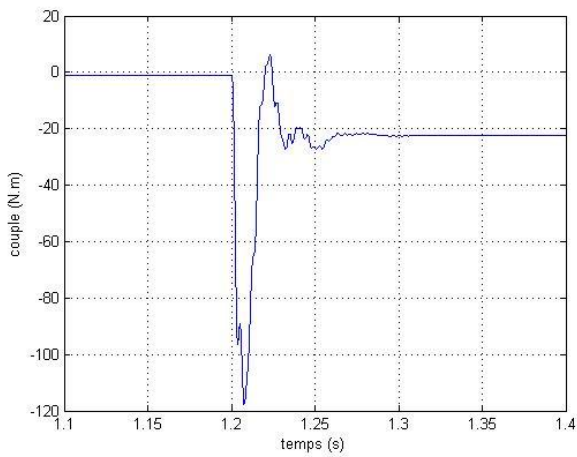
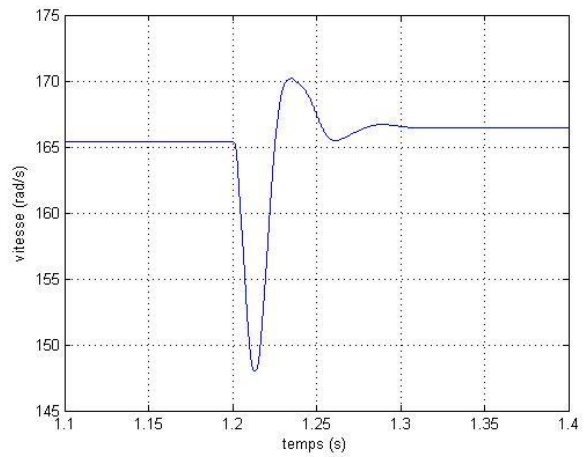


Figure IV -44: Simulation du Courant rotorique pendant l'accrochage

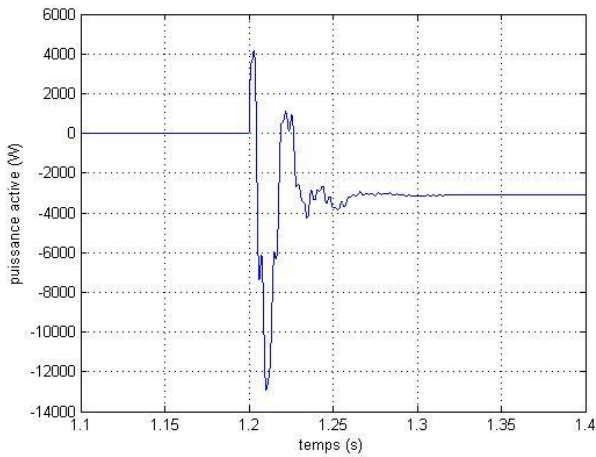


- a -

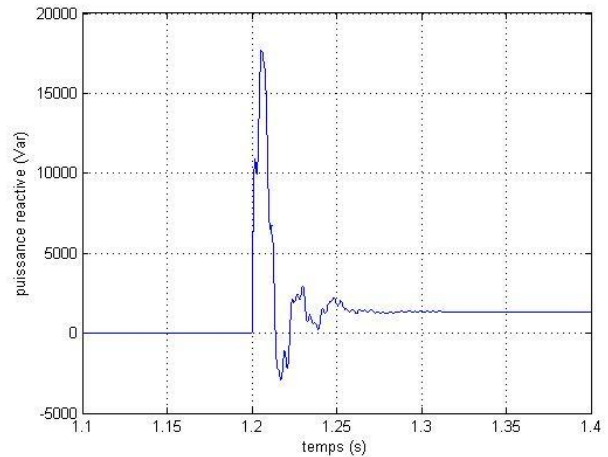


- b -

Figure IV -45: Simulation du Couple et vitesse pendant l'accrochage
(a) : couple, (b) : vitesse



- a -



- b -

Figure IV -46: Simulation des Puissances active et réactive pendant l'accrochage
(a) : puissance active, (b) : puissance réactive

➤ Interprétation des résultats

Une fois la tension fournie par le générateur est proche de la tension de réseau nous pouvons procéder à l'accrochage du GAS au réseau, le stator de la génératrice qui est toujours connectée aux condensateurs sera connecté aussi au réseau par le biais d'une ligne de transmission.

A l'accrochage des pics apparaissent au niveau des tensions des condensateurs qui finissent par se stabiliser à une valeur égale à la tension du réseau (Fig.IV-43).

Nous remarquons aussi des pics de courants au niveau du stator de la machine. Ces pics sont dus à la variation brusque de la tension et seront transmis à l'armature rotorique par effet de couplage magnétique (Fig.IV-44).

Les pics de courants au niveau du stator et au rotor de la machine vont engendrer des perturbations au niveau des puissances actives et réactives échangées avec le réseau.

Nous remarquons un autre pic au niveau du couple électromagnétique développé par le GAS qui est une conséquence directe des pics de courants, cette valeur trop élevée de couple va causer des perturbations au niveau de la vitesse de rotation de la machine (Fig.IV-45).

IV.5.3. Application du creux de tension de tension à la machine

➤ Nous présentons sur les figures suivantes, les résultats de simulation des grandeurs statoriques et rotoriques ainsi que le couple et la vitesse.

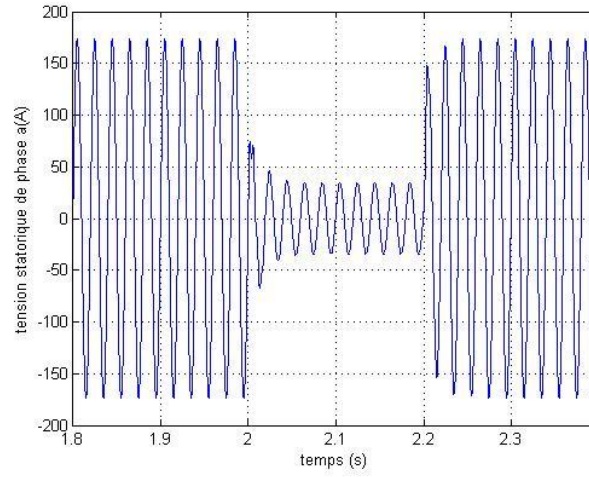
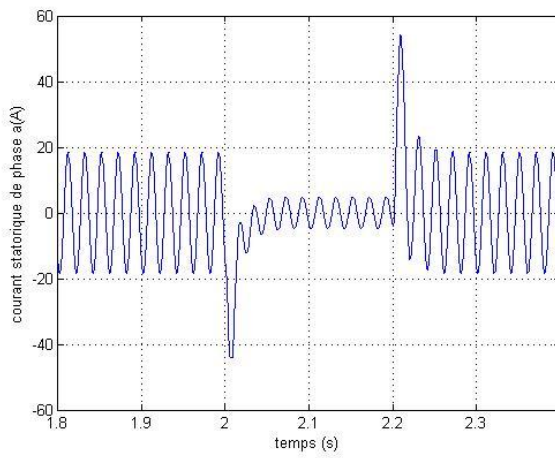
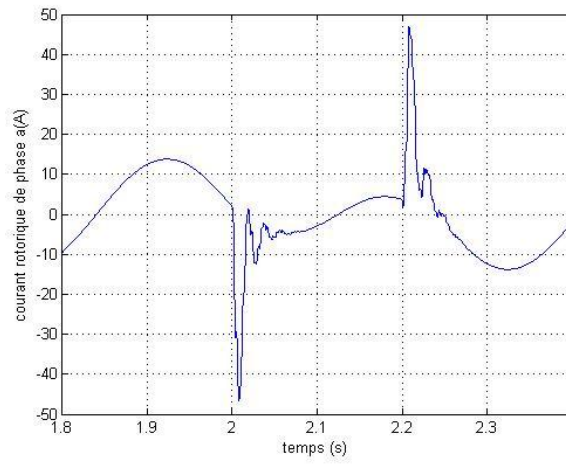


Figure IV -47: Evolution de la tension du condensateur pendant le creux de tension

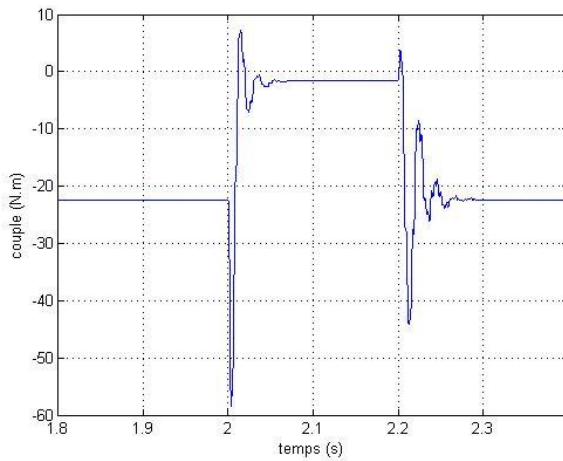


- a -

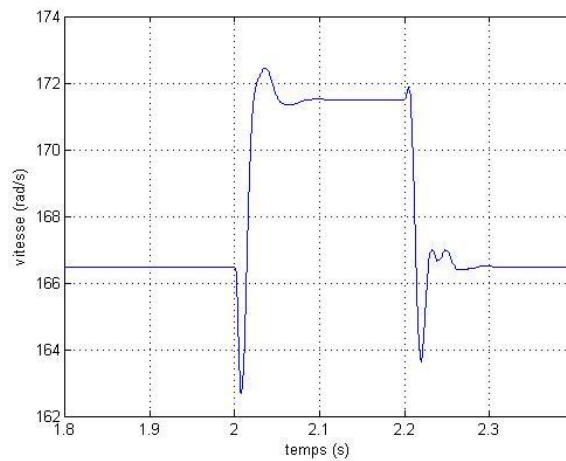


- b -

Figure IV -48: Courants statorique et rotorique pendant le creux de tension
(a) : courant statorique, (b) : courant rotorique

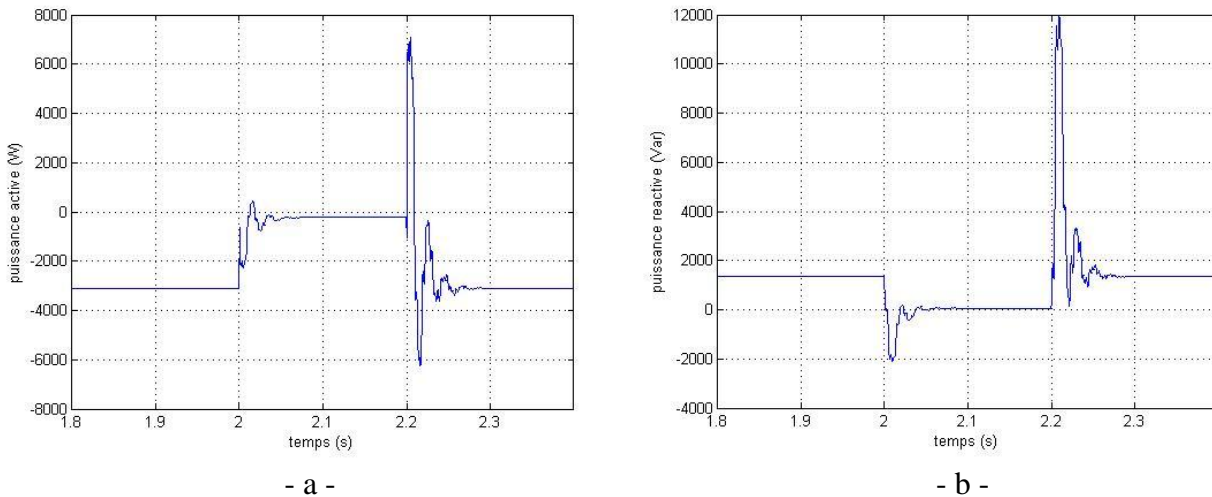


- a -



- b -

Figure IV -49: Couple et vitesse pendant le creux de tension
(a) : vitesse, (b) : couple



- a -
 Figure IV -50: Puissances active et réactive pendant le creux de tension
 (a) : puissance active, (b) : puissance réactive

➤ Interprétation des résultats

La tension aux bornes de la machine diminue au moment du creux et retrouve la tension du réseau au rétablissement de celle-ci (Fig.IV-47).

Nous remarquons des pics de courants au niveau du stator et du rotor de la machine à l' instant de la diminution de la tension et a l' instant de rétablissement de la tension (Fig.IV-48).

Nous remarquons aussi des pics sur le couple électromagnétique au moment de la diminution et du rétablissement de la tension. Le couple électromagnétique prend une valeur trop faible durant le creux de tension provoquant ainsi l'augmentation de la vitesse de rotation durant le creux de tension (Fig.IV-49)..

Des pics de valeurs trop importantes se sont apparues sur la puissance active et réactive surtout au moment de rétablissement de la tension (Fig.IV-50).

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons examiné le comportement de la MADA durant le creux de tension, ce type de défaut présente un danger pour l'équipement d'électronique de puissance relié au rotor de la machine.

Nous avons présenté les recommandations des opérateurs du réseau qui imposent que les fermes éoliennes restent connectées au réseau durant le creux de tension. Pour cette raison nous avons introduit le système de protection connu sous le nom du crowbar. Ce système permet à la MADA de restée connectée au réseau en cas de creux de tension tout en assurant la protection de la machine. Cette protection concerne plus particulièrement l'équipement de l'électronique de puissance et l'engrenage mécanique.

Nous avons proposé une amélioration du crowbar classique, cette méthode qui est basée sur l'utilisation des résistances d'amortissement au niveau du stator a prouvé son efficacité notamment en ce qui concerne l'élimination des pics de courants et la réduction de l'enveloppe des oscillations du couple et de puissance.

Nous avons terminé ce chapitre par une comparaison avec le générateur a vitesse fixe dans ce cas nous constatons que la MADA supporte mieux les perturbations de réseau.

Conclusions générales et perspectives

Ce présent mémoire porte sur l'analyse et la protection de la MADA durant le creux de tension. Dans le premier chapitre nous avons donné un aperçu sur l'énergie éolienne et les différentes structures des aérogénérateurs, après avoir effectué une comparaison entre les différentes structures présentes actuellement nous avons constaté que la MADA constitue la structure la mieux adaptée pour l'exploitation de l'énergie éolienne.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressés au principe de fonctionnement de la MADA fonctionnant comme générateur raccordé au réseau, ensuite nous avons entamé la modélisation de la machine sous quelques hypothèses simplificatrices, un modèle linéaire dans le repère de RH.PARK ainsi qu'un modèle tenant compte de la saturation.

Le troisième chapitre est dédié à la commande de la chaîne de conversion. Nous avons présenté une technique de commande vectorielle de puissances de la MADA basée sur l'orientation du flux statorique et une technique de commande du convertisseur coté réseau permettant d'assurer le fonctionnement à facteur de puissance unitaire. Nous avons vu comment les régulateurs de type PI peuvent participer à la régulation et l'optimisation des puissances fournies par la MADA.

Dans le quatrième chapitre nous avons utilisé un modèle complet qui tient compte de différents phénomènes physiques présents au niveau de la MADA. Nous nous sommes servi de ce modèle pour faire une analyse précise de la MADA durant le creux de tension, nous avons donné quelques explications des différents phénomènes qui se produisent lors de défaut.

Nous avons détaillé le principe de protection de la MADA par le crowbar qui a été utilisé pour assurer la continuité du fonctionnement de la MADA en cas de défaut sur le réseau de distribution assurant ainsi une conformité aux GRID CODES.

Nous avons proposé une amélioration du crowbar classique en ajoutant des résistances d'amortissement au niveau du stator. Cette technique permet de réduire les transitoires des courants, couple et puissance contribuant ainsi à la protection et à la fiabilité des différents composants de la chaîne de conversion.

La comparaison avec le générateur à vitesse fixe a montré l'avantage de l'utilisation de la MADA au lieu de l'autre structure.

En perspectives de ce projet nous proposons :

- Généraliser cette étude pour les éoliennes à de grandes puissances et étudier l'impact d'une ferme éolienne sur le réseau de distribution tout en tenant compte de la topologie du réseau et en proposant une étude de la stabilité dynamique du réseau.
- L'emploi de nouveaux algorithmes de commande utilisant cette fois-ci des lois de commande non linéaires qui peuvent améliorer le rendement de la chaîne de conversion.
- L'utilisation de nouvelles techniques de protection citant les méthodes actives utilisant des circuits de protection et des lois de commande appropriées.
- Nous pouvons aller plus loin en proposant de nouvelles stratégies de commandes qui peuvent assurer le fonctionnement de la MADA en cas de défaut sans avoir recours à des dispositifs de protection supplémentaires.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. M. RAPIN, P. LECONTE. « Eoliennes ». Technique De L'ingénieur, 2009.
- [2]. T. WILDI, G. SYBILLIE. « Electrotechnique ». 4^e édition, De Boeck, CANNADA, 2005, pp. 1238.
- [3]. M. POULOUJDOFF. « Machines asynchrones ». Technique De L'ingénieur, 2000.
- [4]. M.A. KHELIFI. « Influence of Cross-Saturation on the Various Models of Induction Machine ». Journal of Automation and control Engineering Vol.4, No. 4, August 2016, pp.268-272.
- [5]. I. HAMZAOUI. « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur ». Mémoire de Magister, ENP, 2008, Alger.
- [6]. D. KHAIROUS. « Calcul analytique du couple et des courants dans une machine asynchrone auto excitée au réseau ». Mémoire de Magister, ENP, 2004, Alger.
- [7]. A. NESBA. « Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone ». Thèse de doctorat, ENP, 2007, Alger.
- [8]. A. BISKER, M.CHIRI. « Commande d'un système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau ». Projet de fin d'étude, ENP, 2012.
- [9]. Z. XUEGUI, F. ZHIHONG, S. XIANGFENG. « A Novel Unit Power Factor Rectifier Based on Three-Phase Digital PLL ». TELKOMNIKA, Vol. 11, No. 7, July 2013, pp. 3925 – 3934.
- [10]. S. METATLA. « Optimisation et Régulation des Puissances d'une Eolienne à Base d'une MADA ». Mémoire de Magister en Electrotechnique, ENP, 2009, Alger.
- [11]. A. MOUALDIA. « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne ». Thèse de doctorat, ENP, 2014, Alger.
- [12]. S. EL AIMANI. « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyen tension ». Thèse de doctorat, Ecole Centrale de LILLE et Université Des Sciences et Techniques de LILLE, 2004.
- [13]. R.ABDESSAMED. « Modélisation et simulation des machines électriques » Edition ellipses, Paris, 2011, pp.236.
- [14]. S.N. GAYATHRI, T. KRISHNAKUMARI. « Comparison of Crowbar Control and Novel Control Methods for DFIG Wind Turbine to Enhance LVRT Capability under Various Faults ». International Journal Of Electrical Engineering & Technology, Volume 5, Issue 12, December 2014, pp. 14-20.
- [15]. M.A. DAMI, K. JEMLI, M. GOSSA. « Doubly Fed Induction Generator, With Crow-Bar System, under Micro-Interruptions Fault ». International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Volume 2, Number 3, 2010, pp.216-231.
- [16]. M.Q. DUONG, G.N SAVA, F. GRIMACCIA. « Improved LVRT based on Coordination Control of Active Crowbar and Reactive Power for Doubly Fed Induction Generators ». Conference

paper, 9th international Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 7-9 May 2015 Bucharest, pp. 650-655.

[17]. Y.A NAGY, M.A GABR, M.M KABSHA. « Simulation and Evaluation of Low Voltage Ride through Protection Techniques for DFIG ». Conference paper, IEEE, Power and Energy Society General Meeting, 22-26 July 2012 SAN DIEGO, pp. 1-5.

[18]. A. OLIMPO, L. ZIFA, Q. GUSTAVO, R. JAMES. « Optimal DFIG Crowbar Resistor Design under Different Controllers during Grid Faults ». Conference paper, IEEE, Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 6-8 April 2008 NANJING, pp. 2580-2585.

[19]. C. YUTANA. « New Method of Setting the Maximum Crowbar Resistance for doubly-Fed Induction Generators under Grid Faults ». Conference paper, IEEE, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and information technology, 14-17 May 2014 Nakhon Ratchasima, pp.1-6.

[20]. D. MING, H. TENGHUA, H. PINGPING, W. DONGJUN. « Analysis of Low Voltage Ride through Ability of Variable Speed Constant Frequency Wind Turbine Based on Crowbar Protection». Conference paper, IEEE, Asia-pacific Power and Energy Engineering Conference, 27-29 March 2012 Shanghai, pp. 1-5.

[21]. L. SUN, P. YANG, Y. WANG. « Simulation Research for LVRT of DFIG Based on Rotor Active Crowbar Protection ». Conference paper, IEEE, Sustainable Power Generation and Supply, 8-9 September. 2012. Hangzhou, pp. 1-7.

[22]. R. Yuan, Z. Wei, « A Novel Control Strategy of an Active Crowbar for DFIG-Based Wind Turbine during Grid Defaults », IEEE International Electric machines & Drives Conference (IEMDC), 15-18 May 2011. Niagara Falls. ON, pp. 1137-1142.

[23]. K.A. Francisco, L. ALVARO, P. RODRIGUEZ « Rotor Voltage Dynamics in the doubly fed Induction Generator during Grid Faults ». IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 25, issue: 1, 2009, pp. 118-130.

[24]. M.Ezzat, M.Benbouzid, S.Muyeen, L.Harnefors, « Low-Voltage Ride through Techniques for DFIG-Based Wind Turbines: State-of-the-Art Review and Future Trends ». IEEE IECON 2013, Novembre 2013, Vienne, Autriche. pp. 7681-7686, 2013.

[25]. T.KHALDI, « Retour réseau sur un autoamorçage accidentel de la machine asynchrone », Thèse de Magister, ENP, Alger, Juillet 1999.

[26]. G.D. Marques and D.M. Sousa, « Understanding the doubly fed induction generator during voltage dips » IEEE. Trans. Energy Conversion, vol. 27, n°2, Juin 2012, pp. 421-431.

[27]. Y. Ling and X. Cai, « Rotor current dynamics of doubly fed induction generators during grid voltage dip and rise » International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 44, n°1, Janvier 2013, pp. 17-24.

[28]. M. Rahimi and M. Parniani, «Low voltage ride-through capability improvement of DFIG-based wind turbines under unbalanced voltage dips, » International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 60, septembre 2014, pp. 82-95.

- [29]. Mohamed Benbouzid, Sm Muyeen, Farid Khoucha. An Up-to-Date Review of Low-Voltage Ride-Through Techniques for Doubly-Fed Induction Generator-Based Wind Turbines. International Journal of Energy Conversion, 2015, pp.1-9.
- [30].M.K.Dosoglu, « Hybrid low voltage ride through enhancement for transient stability capability in wind farms », International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 78, Novembre 2015, pp.655-662.
- [31].G.Nicola, M.Duong, S.Leva « Coordination control of active crowbar for doubly fed Induction Generators», International symposium of Fundamentals of Electrical Engineering, Conference paper, novembre 2014, pp.138-144.
- [32].Y.Ren, W.Zhang « A Novel control strategy of an active crowbar for DFIG-Based Wind turbine during grid faults », IEEE, International Electric Machines & Drives Conference, 2011,pp.1137-1142.
- [33]. Frede,Blaabjerg, K.Ma, « Futur on Power Electronics for Wind Turbine Systems », IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol 1, N. 3, Septembre 2013, pp.139-152.

ANNEXES

Paramètres de la MADA

La machine utilisée est à rotor bobiné avec les caractéristiques suivantes :

$$P_n = 3.5kW, N_n = 1410 \text{ tr/mn}, U_n = 220\backslash 380V, 2p = 4, f = 50Hz$$

$$\text{Courant} = 14/8A$$

$$\text{Résistance par phase du stator} : R_s = 0.76 \Omega$$

$$\text{Résistance par phase du rotor ramenée au stator} : R_r = 0.74 \Omega$$

$$\text{Mutuelle inductance de magnétisation} M = 0.074 \text{ H}$$

$$\text{Inductance de fuite stator et rotor} l_s = l_r = 0.003 \text{ H}$$

$$\text{Inductance cyclique stator et rotor} L_s = L_r = 0.077 \text{ H}$$

Paramètres de la machine à courant continu

La machine utilisée est une machine à courant continu à excitation séparé avec les caractéristiques suivantes :

$$P_n = 4kW$$

$$N_n = 1500 \text{ tr/mn}$$

$$V_n = 240V$$

$$\text{Résistance de l'induit} R_a = 0.615 \Omega$$

$$\text{Inductance de l'induit} L_a = 4.5 \text{ mH}$$

$$\text{Coefficient du couple} h = 1.6 \text{ Nm/A}$$