

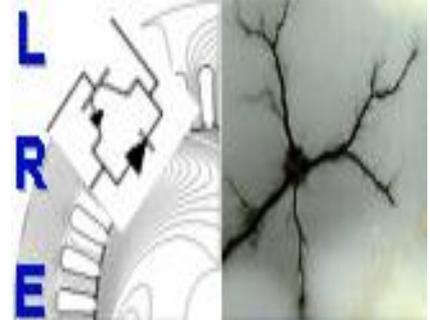
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



**Département d'ELECTROTECHNIQUE**  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire  
pour l'obtention du diplôme de  
**Master en Electrotechnique**

Intitulé

**Etude de l'influence des résistances d'amortissements rotoriques sur  
le comportement de la MADA Durant le creux de tension**

Présenté par  
**Nasreddine KESBIA**

Sous la direction de Pr. S. Mekhtoub  
soutenu publiquement le 20 juin 2016

**Membres du Jury**

Président :	M.O. Mahmoudi Professeur à l'ENP
Rapporteur :	S. Mekhtoub, Professeur à l'ENP
Examineur :	R. Ibtouen, Professeur 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 الامتزازي ذو السرعة الثابتة. ثم نقترح طريقة لحماية المولد ثنائي التغذية تسمح له بالعمل اثناء نقص في التوتر.

**كلمات مفتاحية:** الة لامتزازية ثنائية التغذية، مولد لامتزازي 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 Mouhamed Oulhaj Mahmoudi, Enseignant au Département d'Electrotechnique, de nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Nous remercions aussi Monsieur Rachin Ibtouen, Chef Département d'Electrotechnique, 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.

## *Dédicace*

*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*

*Merci infiniment*

# Table des matières

Liste des figures .....	7
Introduction générale .....	10
<b>CHAPITRE I : MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION</b> .....	<b>11</b>
I.1. Introduction .....	12
I.2. Modes de fonctionnement de la MADA .....	12
I.3. Modèle linéaire de la MADA dans le plan d, q.....	14
I.3.1. La transformation de R.H.Park .....	14
I.3.2. Equations électriques de la MADA dans le repère d, q .....	14
I.3.3. Equation du couple électromagnétique : .....	15
I.3.4. Choix de référentiel.....	16
I.3.5. Validation du modèle linéaire : .....	17
I.4. Conclusion.....	18
<b>CHAPITRE II : COMMANDE DE LA CHAINE DE CONVERSION</b> .....	<b>19</b>
II.1. Introduction .....	20
II.2. Modélisation de l'interconnexion au réseau.....	20
II.2.1. Modélisation de l'onduleur côté machine et côté réseau .....	20
II.2.2. Modélisation de bus continu .....	22
II.2.3. Modélisation du filtre passif .....	23
II.3. Commande des convertisseurs d'EP .....	24
II.3.1. Commande de convertisseur côté machine (CCM) .....	24
II.3.2. Commande de convertisseur côté réseaux (CCR).....	25
II.4. Simulation de la chaine de conversion .....	27
Résultats de simulation : .....	28
Interprétations .....	30
II.5. Conclusion.....	30
<b>CHAPITRE III : ANALYSE ET PROTECTION DE LA MADA DURANT LE CREUX DE TENSION</b> .....	<b>31</b>
III.1. Introduction.....	32
III.2. Analyse de la MADA durant un creux de tension .....	32
Définition d'un creux de tension .....	32
III.2.1. Simulation de la MADA durant un creux de tension.....	33
III.2.2. Interprétations des résultats .....	36
III.3. Recommandations des Grid codes.....	36
III.4. Protection de la MADA durant le creux de tension.....	37
III.4.1. Technique de protection durant le creux de tension .....	37
III.4.2. Crowbar avec résistance rotorique et détection par critère de tension.....	38

III.4.3. Influence de la valeur de la résistance du crow bar .....	46
III.5. Conclusion .....	47
Conclusions générales et perspectives .....	48
BIBLIOGRAPHIE .....	49

## 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

$\phi_s$  : Flux statorique

$\phi_r$  : Flux rotorique

$\phi_d$  : Flux suivant l'axe d

$\phi_q$  : Flux suivant l'axe q

$\omega_s$  : Pulsation statorique

$\omega_e$  : Pulsation du repère

$\omega_r$  : 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

$M$  : Mutuelle inductance cyclique

$\Gamma_e$  : Couple électromagnétique

$J_s$  : Moment d'inertie

$f_r$  : Coefficient de frottement visqueux

$\Omega$  : Vitesse de rotation

$P(\theta)$  : Matrice de transformée de R.H.Park

$P^{-1}(\theta)$  : Matrice de transformée inverse de R.H.Park

$P$  : 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: Modes de fonctionnement de la MADA [2] .....	13
Figure I-2: Passage du plan ABC vers d, q .....	14
Figure I-3: Résultats de simulation de démarrage de la machine asynchrone .....	17
Figure II-1: Schéma d'un onduleur de tension à deux niveaux .....	20
Figure II-2: Schéma représentatif de bus continu .....	22
Figure II-3: Schéma équivalent de la liaison au réseau .....	23
Figure II-4: Schéma représentant les stratégies de commande des convertisseurs associés à la MADA .....	24
Figure II-5 : Schéma de la commande vectorielle indirect .....	25
Figure II-6: Liaison de CCR au réseau [10].....	25
Figure III-7: Schéma de régulation de bus continu [10] .....	27
Figure III-8: Représentation schématique du système de conversion électromécanique .....	28
Figure II-9: Les puissances échangées entre la MADA et le réseau.....	28
Figure II-10: Vitesse et couple développées par la MADA.....	29
Figure II-11: Les courants circulant dans la MADA .....	29
Figure II-12: Tension de bus continu et énergie réactive (a) : tension de bus continu, (b) : énergie réactive.....	30
Figure III-1: Creux et coupure de la tension de réseau [15] .....	32
Figure III-2: Creux de tension de 80%.....	33
Figure III-3: Les courants statorique durant le creux de tension .....	33
Figure III-4: Les courants rotoriques durant le creux de tension.....	33
Figure III-5: Tension du bus continu et les courants dans les convertisseurs statiques durant le creux de tension .....	34
Figure -III-6: La vitesse et le couple électromagnétique durant le creux de tension .....	34
Figure-III-7: Puissances active et réactive échangées avec le réseau durant le creux de tension (a) : puissance active, (b) : puissance réactive.....	35
Figure III-8: l'énergie réactive durant le creux de tension .....	35
Figure-III-9: puissances active et réactive échangées entre le CCR et le réseau durant le creux de tension .....	35
Figure III-10: Recommandation du Grid code pour le LVRT [24] .....	37
Figure-III-11: Schéma de principe de protection par crowbar [14] .....	38
Figure III-12: Organigramme illustrant la technique de commande de crowbar.....	39
Figure -III-13: Creux de tension de 80% .....	39
Figure-III-14: Courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar .....	39
Figure -III-15: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar .....	40
Figure -III-16: Tension de bus continu et les courants dans les convertisseurs statiques avec protection crowbar .....	40
Figure III-17: Puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar .....	41
Figure III-18: l'énergie réactive avec protection crowbar .....	41
Figure III-19: courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar .....	41
Figure III-20: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar .....	42
Figure III-21: Tension de bus continu et courants des convertisseurs statiques avec protection crowbar.....	42
Figure III-22: puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar.....	43
Figure III-23: l'énergie réactive avec protection crowbar .....	43
Figure III-24: Courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar .....	43

Figure-III-25: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar .....	44
Figure III-26: Tension de bus continu et courants des convertisseurs avec protection crowbar .....	44
Figure III-27: Puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar .....	45
Figure III-28: l'énergie réactive .....	45
Figure -III-29: Evolution des pics des grandeurs de la MADA en fonction de la résistance d'amortissement à l'instant du creux de tension .....	46

## 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.

Le premier 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 deuxième 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 troisième 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'.

---

# **CHAPITRE I : MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION**

---

## **I.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 un modèle pour la machine, il issu de l'hypothèse de la linéarité du flux.

## **I.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].

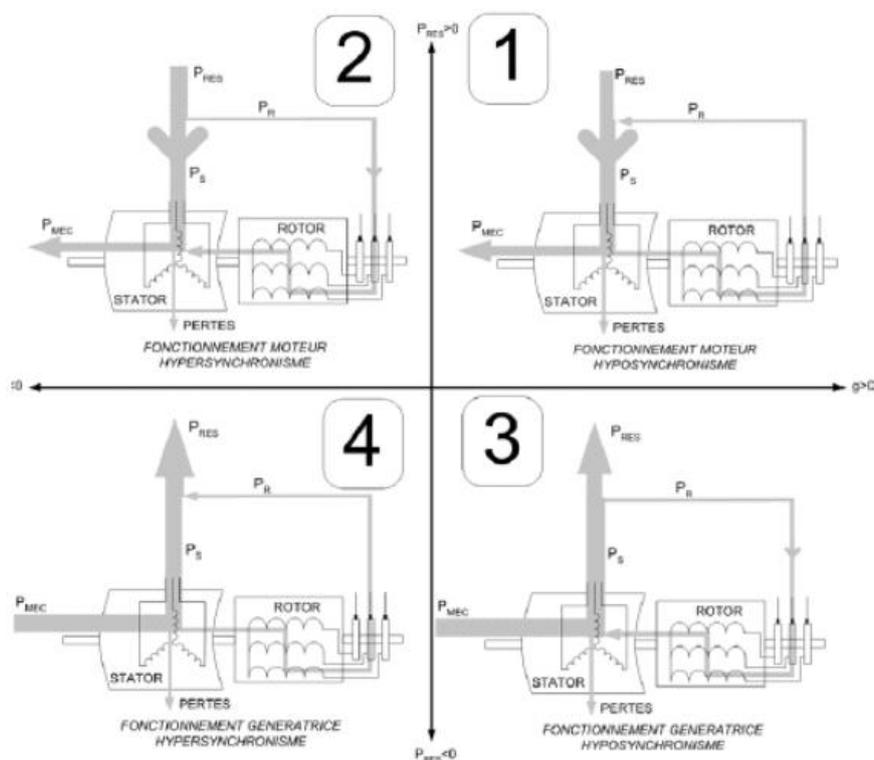


Figure I-1: Modes de fonctionnement de la MADA [2]

#### I.2.1.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

Pour ce mode de fonctionnement Fig.I.1 (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.

#### I.2.1.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

Pour ce mode de fonctionnement Fig.I.1 (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.

#### I.2.1.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

Pour ce mode de fonctionnement Fig.I.1 (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.

#### I.2.1.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

Pour ce mode de fonctionnement Fig.I.1 (4), la MADA est utilisée comme génératrice pour une vitesse au-dessus 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 génératrice hyper synchrone) qui est le plus répandu pour les aérogénérateurs [2].

### I.3. Modèle linéaire de la MADA dans le plan d, q

#### I.3.1. La transformation de R.H.Park

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

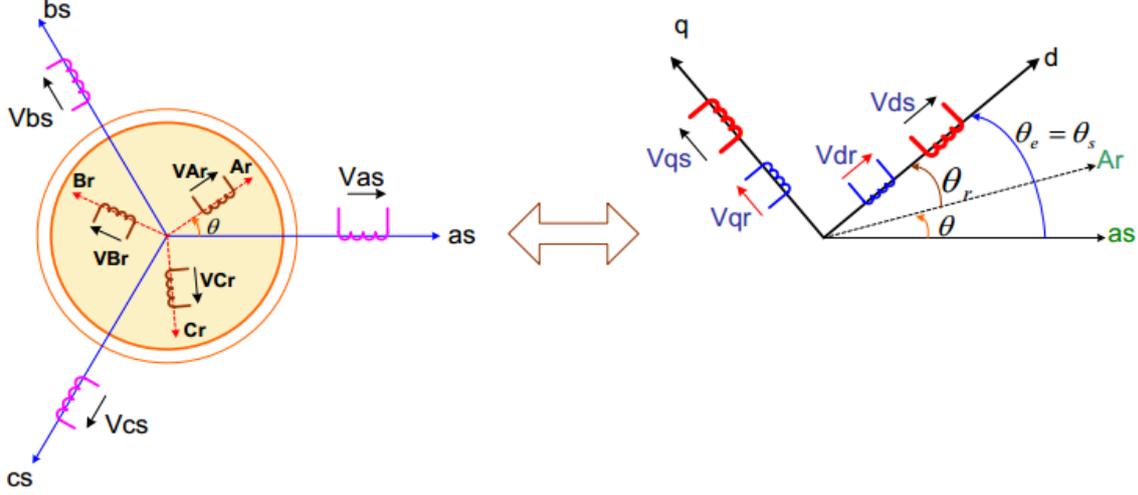


Figure I-2: Passage du plan ABC vers d, q

La matrice de transformation est définie par :

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

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

#### I.3.2. 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] :

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

Les équations électriques deviennent:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_e \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_e \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

De même les équations de flux s'écrivent :

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

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

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p \cdot L_s & -\omega_e \cdot L_s & p \cdot M & -\omega_e \cdot M \\ \omega_e \cdot L_s & R_s + p \cdot L_s & \omega_e \cdot M & p \cdot M \\ p \cdot M & -(\omega_e - \omega) \cdot M & R_r + p \cdot L_r & -(\omega_e - \omega) \cdot L_r \\ (\omega_e - \omega) \cdot M & p \cdot M & (\omega_e - \omega) \cdot L_r & R_r + p \cdot L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

### I.3.3. 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 :

$$P_e = (V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs}) + (V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr}) \quad (\text{I. 6})$$

En remplaçant les tensions par leurs expressions, on trouve :

$$P_e = \omega_s (\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) + (\omega_s - \omega) (\varphi_{dr} \cdot I_{qr} - \varphi_{qr} \cdot I_{dr}) \quad (\text{I. 7})$$

En les flux par leurs expressions (I.4) :

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

D'autre part :

$$\Gamma_e = \frac{P_e}{\Omega} \quad (\text{I. 8})$$

D'où :

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

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

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

### I.3.4. 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 :

#### I.3.4.1. 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 :

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

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.

#### I.3.4.2. Référentiel lié au rotor :

Il se traduit par les relations suivantes :

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

Donc on aura le système d'équations suivant :

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

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

#### I.3.4.3. 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 I.3 s'écrivent:

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

Les équations sous forme matricielle s'écrivent :

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

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

### I.3.5. 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 :

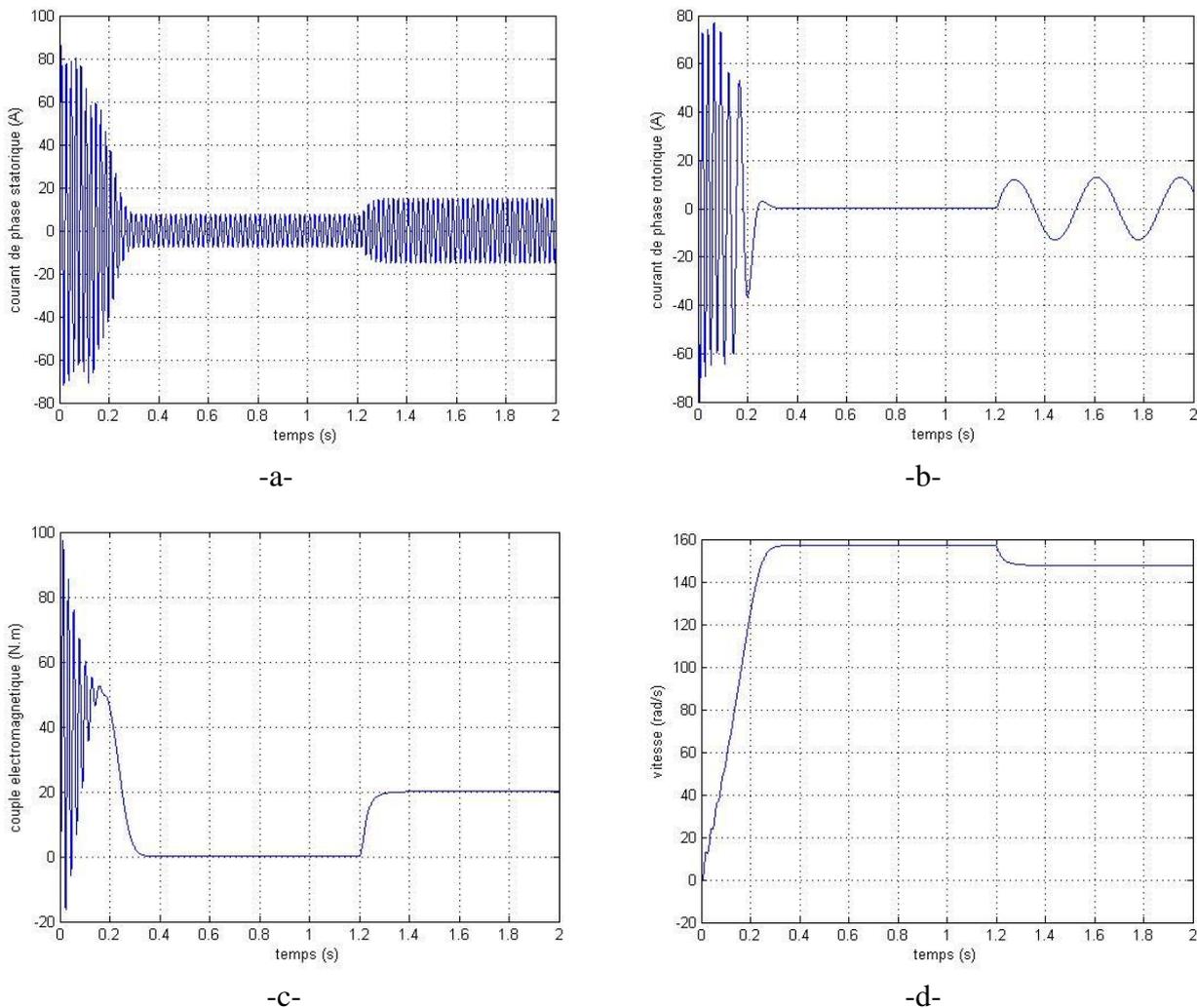


Figure I-3: Résultats de simulation de démarrage de la machine asynchrone  
 (a) : courant de phase statorique, (b) : courant de phase rotorique  
 (c) : couple électromagnétique, (d) : la vitesse

#### ➤ Interprétations des résultats

- Lors du démarrage nous constatons des pics de courant important au niveau du stator et au rotor (Fig.I-3-a et Fig.I-3-b) qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire.
- Le couple électromagnétique présente des oscillations durant le démarrage de la machine (Fig.I-3-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 I-3-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.

#### **I.4. Conclusion**

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, le modèle présenté est issu de l'hypothèse de linéarité qui servira à la synthèse de commande et de régulateurs.

---

## **CHAPITRE II : COMMANDE DE LA CHAINE DE CONVERSION**

---

## II.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.

## II.2. Modélisation de l'interconnexion au réseau

### II.2.1. 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].

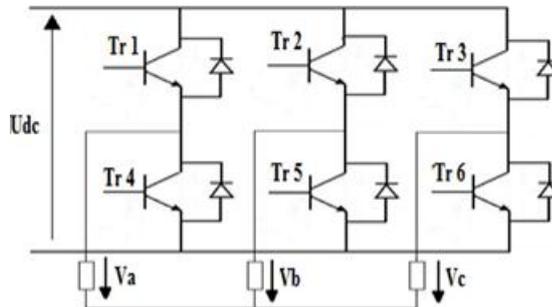


Figure 0-1: Schéma d'un onduleur de tension à deux niveaux

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 :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{DC}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{DC}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{DC}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

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 :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II. 2})$$

D'où on obtient :

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

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 4})$$

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].

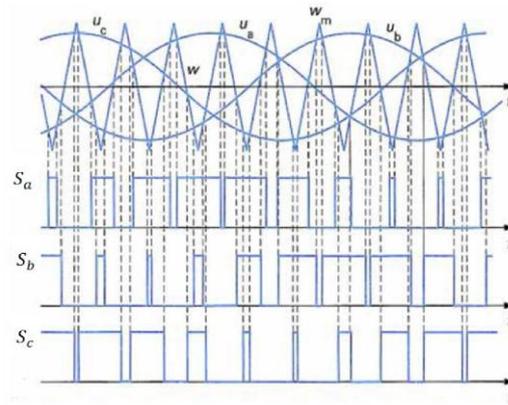


Figure II-0: Les différents signaux de commande des interrupteurs

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

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

### II.2.2. 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 :

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

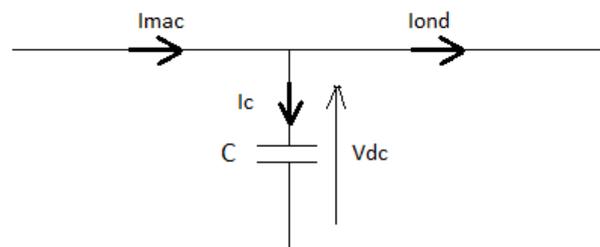


Figure II-2: Schéma représentatif de bus continu

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 :

$$V_{dc} = \frac{1}{C.S}$$

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]. .

### II.2.3. 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  $V_{oi}$  :

$$\begin{cases} V_{ga} - V_{oa} = R_f i_{ga} + \frac{L di_{ga}}{dt} \\ V_{gb} - V_{ob} = R_f i_{gb} + \frac{L di_{gb}}{dt} \\ V_{gc} - V_{oc} = R_f i_{gc} + \frac{L di_{gc}}{dt} \end{cases} \quad (II.5)$$

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

$$\begin{cases} V_{gd} - V_{od} = R_f i_{gd} - L_f \omega_s i_{gq} + \frac{L_f di_{gd}}{dt} \\ V_{gd} - V_{oq} = R_f i_{gq} + L_f \omega_s i_{gd} + \frac{L_f di_{gq}}{dt} \end{cases} \quad (II.6)$$

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

$$\begin{cases} V_{gd} = (R_f + sL_f)I_{gd} - L_f \omega_s I_{gq} + V_{od} \\ V_{gd} = (R_f + sL_f)I_{gq} + L_f \omega_s I_{gd} + V_{oq} \end{cases} \quad (II.7)$$

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

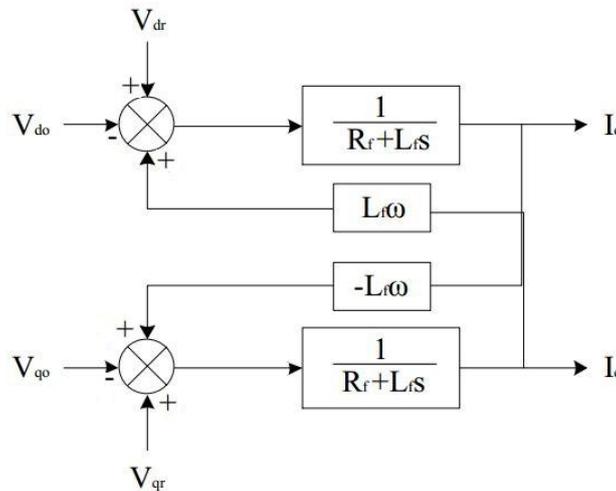


Figure II-3: Schéma équivalent de la liaison au réseau

### II.3. 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.

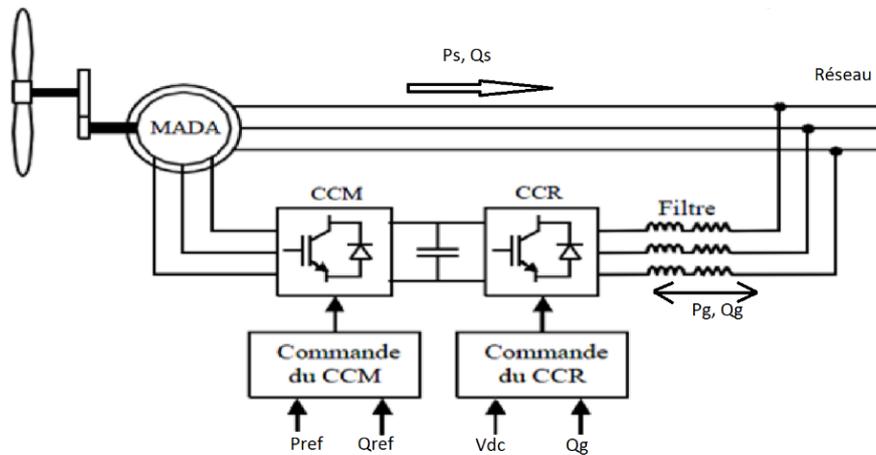


Figure II-4: Schéma représentant les stratégies de commande des convertisseurs associés à la MADA

#### II.3.1. Commande de convertisseur côté machine (CCM)

La commande du convertisseur côté machine est basée sur la technique de commande vectorielle indirecte de puissance, 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.

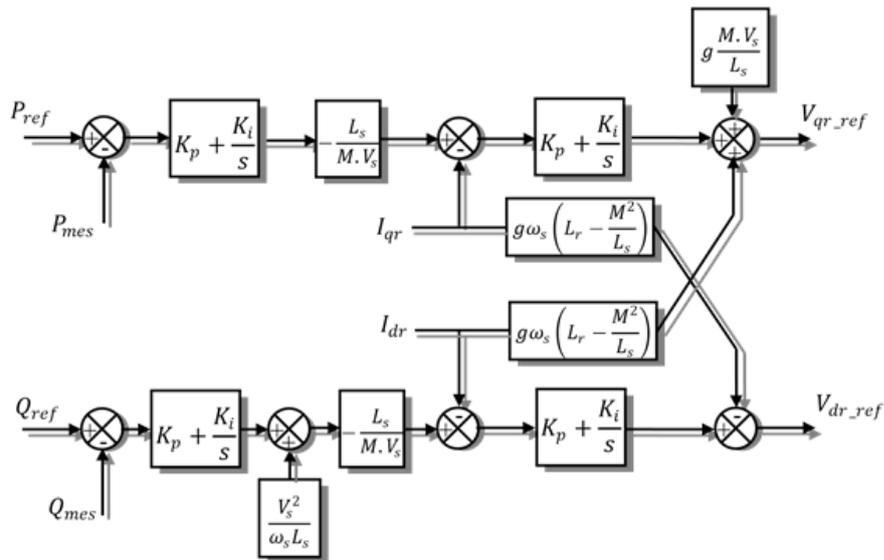


Figure II-5 : Schéma de la commande vectorielle indirect

### II.3.2. 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.

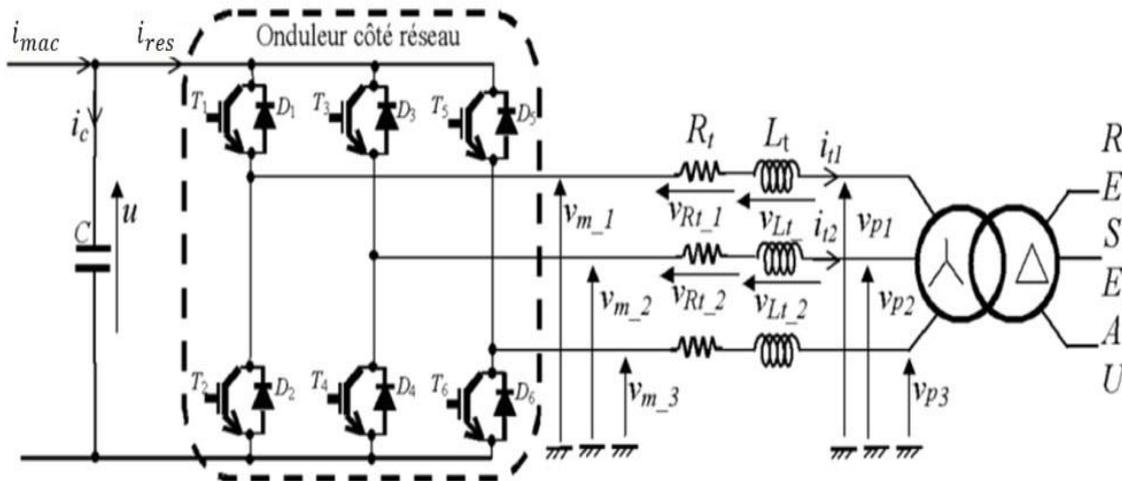


Figure II-6: Liaison de CCR au réseau [10]

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.

#### II.3.2.1. Régulation des courants coté réseaux

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

$$\begin{cases} P = V_{resd}I_{fd} + V_{resq}I_{fq} \\ Q = V_{resq}I_{fd} - V_{resd}I_{fq} \end{cases} \quad (II.8)$$

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

$$\begin{cases} I_{fd_{ref}} = \frac{P_{ref} \cdot V_{resd} + Q_{ref} \cdot V_{resq}}{V_{resd}^2 + V_{resq}^2} \\ I_{fq_{ref}} = \frac{P_{ref} \cdot V_{resq} - Q_{ref} \cdot V_{resd}}{V_{resd}^2 + V_{resq}^2} \end{cases} \quad (II.9)$$

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:

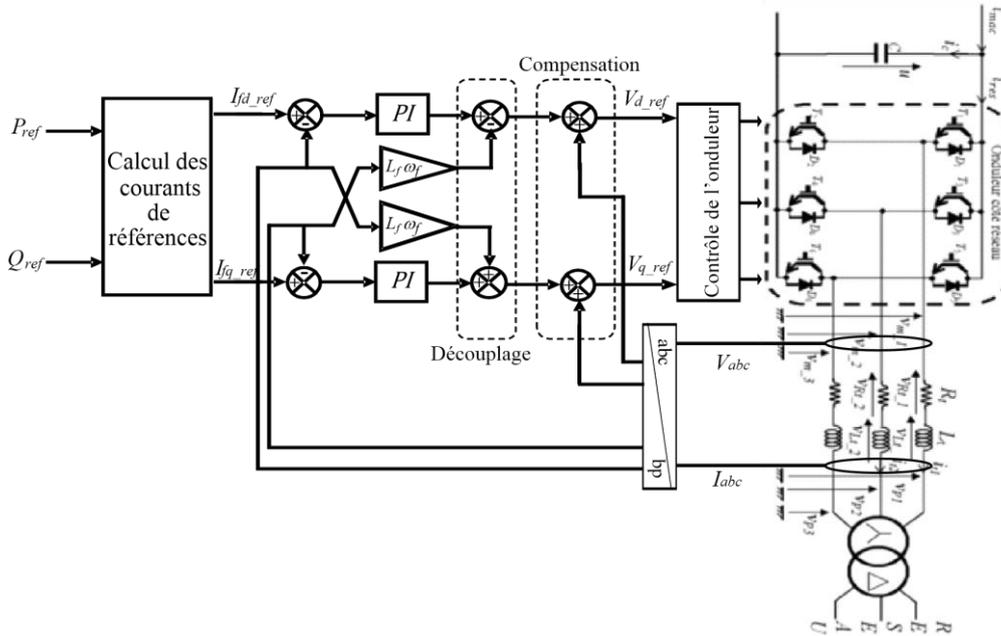


Figure II-8: Contrôle des courants côté réseau [10]

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.

### II.3.2.2. 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 :

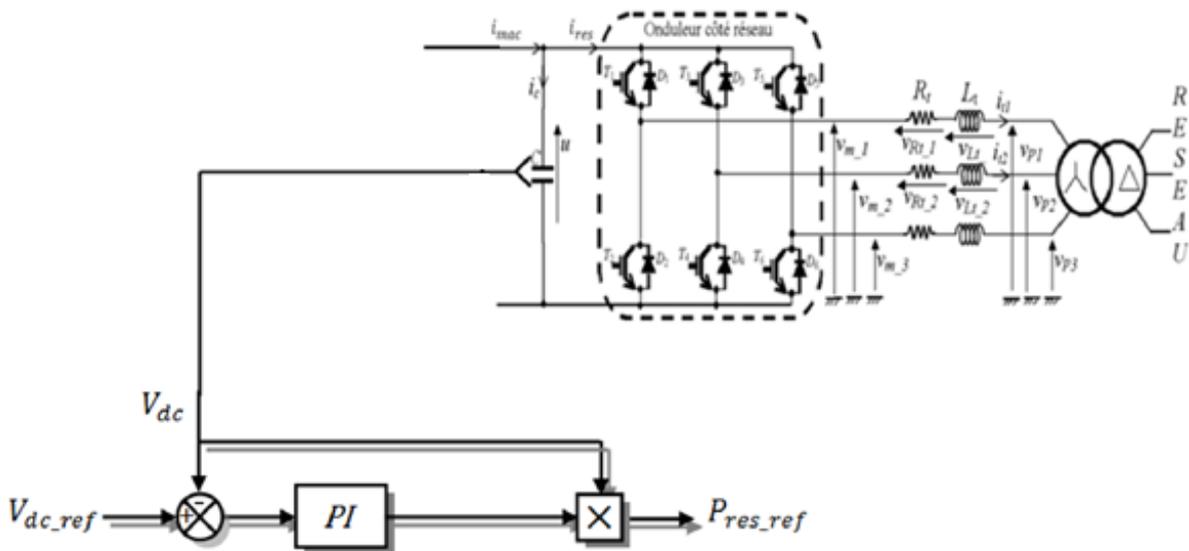


Figure III-7: Schéma de régulation de bus continu [10]

## II.4. 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.

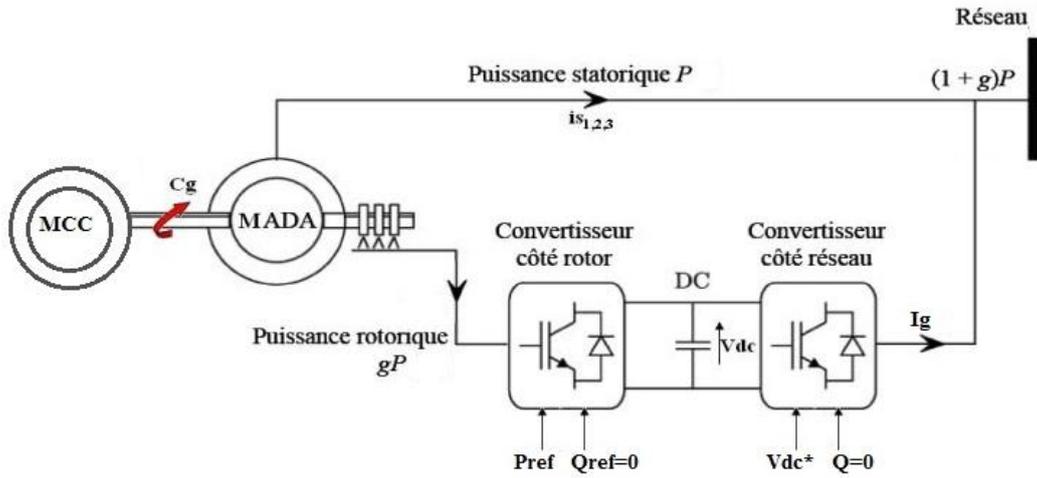
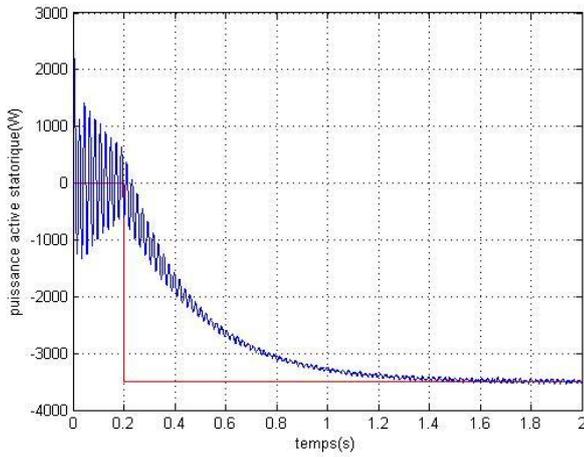
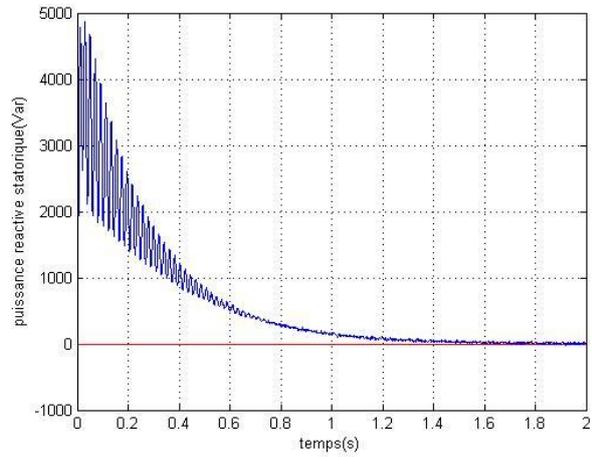


Figure III-8: Représentation schématique du système de conversion électromécanique

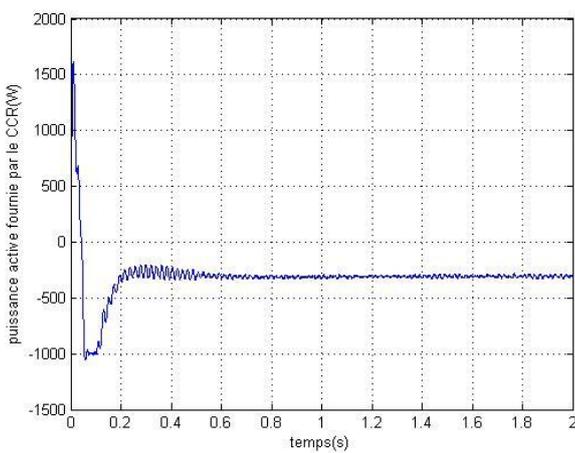
**Résultats de simulation :**



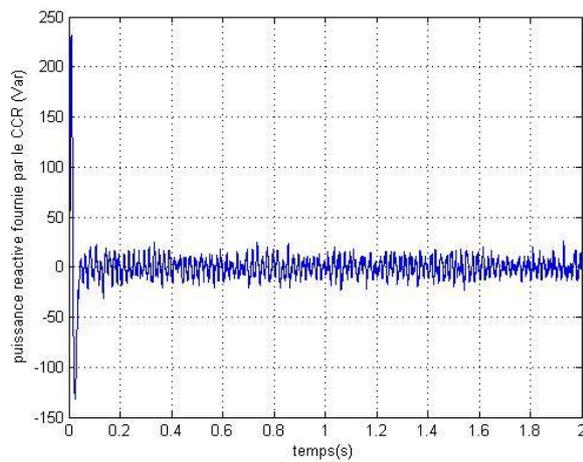
- a -



- b -

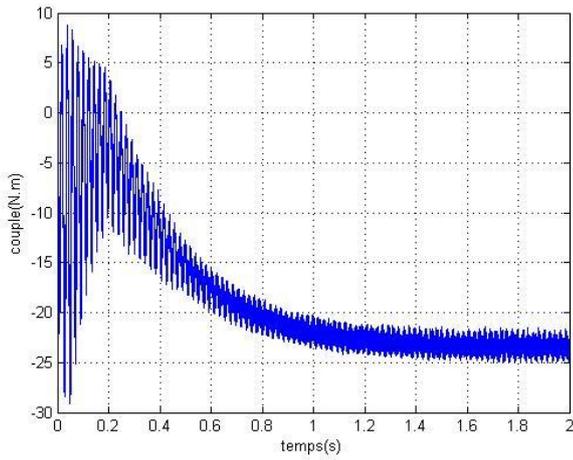


- c -

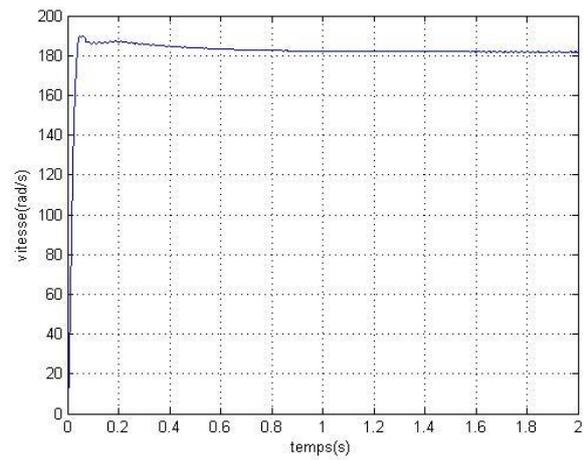


- d -

Figure II-9: 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

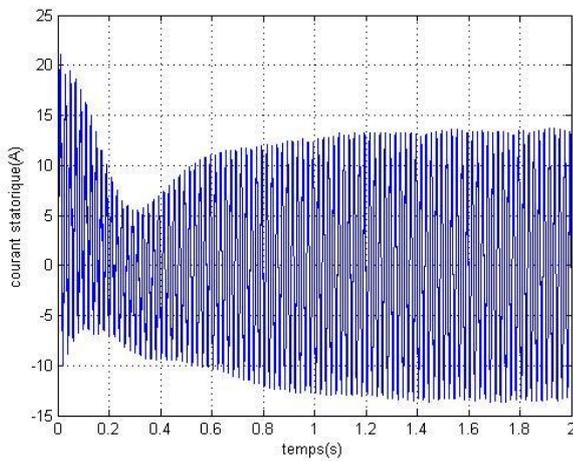


- a -

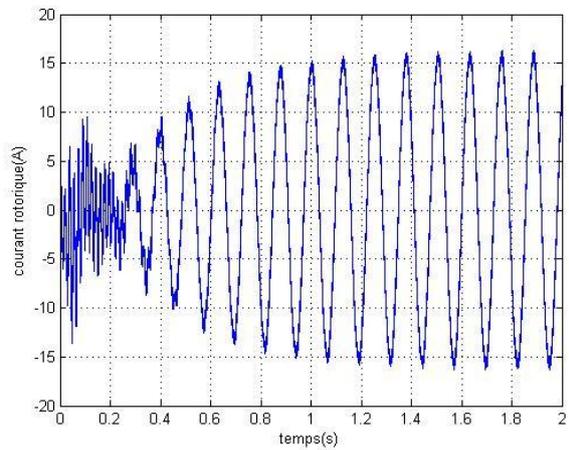


- b -

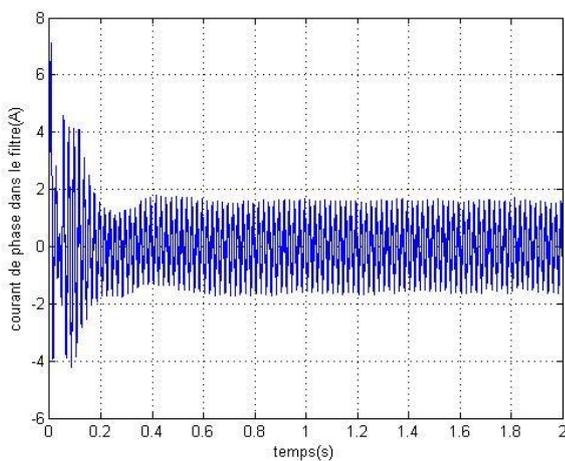
Figure II-10: Vitesse et couple développées par la MADA  
(a) : vitesse, (b) : couple



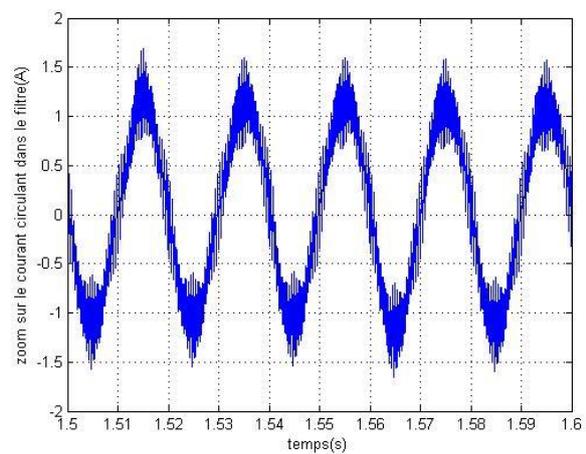
- a -



- b -



- c -



- d -

Figure II-11: 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

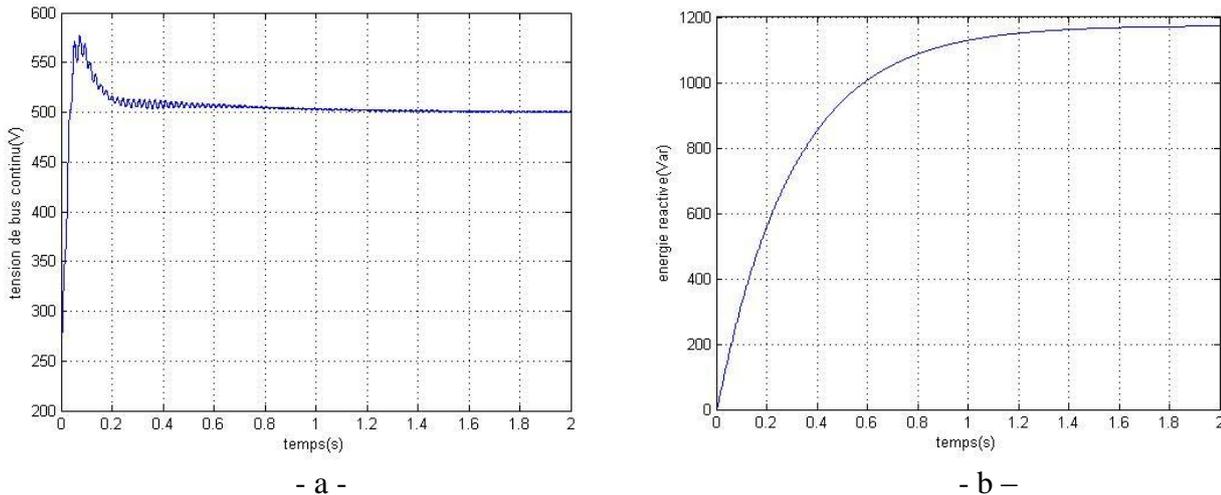


Figure II-12: Tension de bus continu et énergie réactive (a) : tension de bus continu, (b) : énergie réactive

### 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.II-12).
- Les valeurs de cosignes 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.II-11).
- 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.II-13).

## II.5. 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 servirons de ce modèle pour étudier l'impact des perturbations du réseau sur la chaîne de conversion électromécanique.

---

## **CHAPITRE III : ANALYSE ET PROTECTION DE LA MADA DURANT LE CREUX DE TENSION**

---

### III.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.

### III.2. Analyse de la MADA durant un creux de tension

#### 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  $\Delta T$  : 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  $3 s < \Delta T < 1mn$ .

Maintenue  $\Delta T > 1mn$ .

➤ La profondeur  $\Delta V$  : 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.

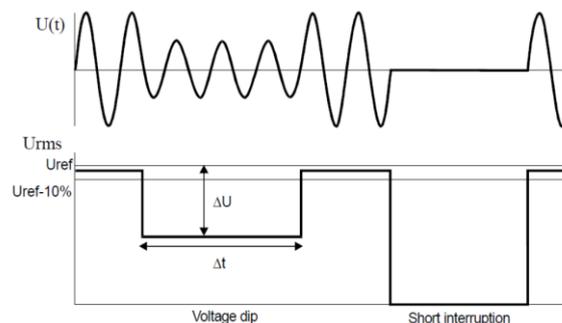


Figure 0-1: Creux et coupure de la tension de réseau [15]

### III.2.1. 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

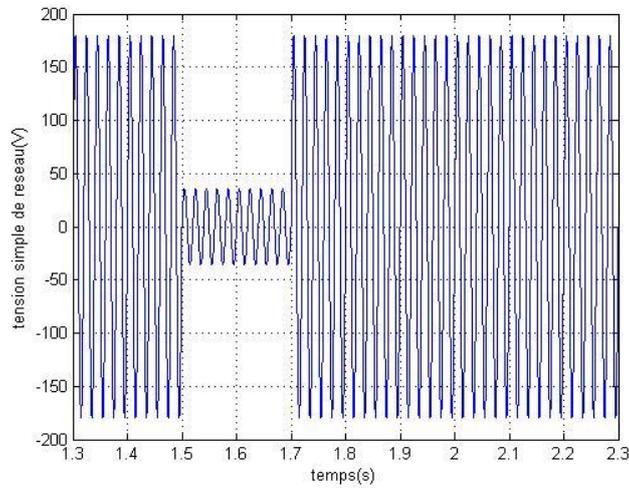
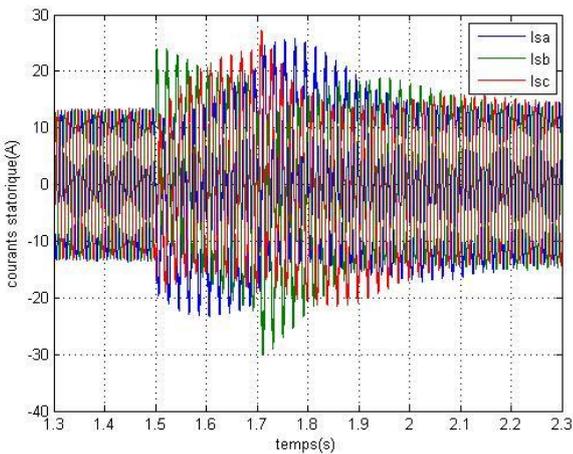
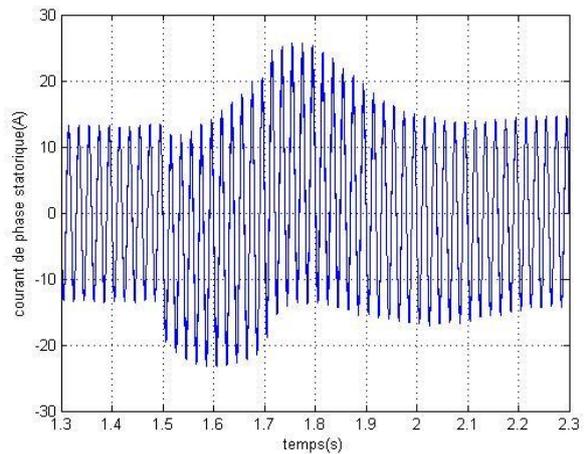


Figure 0-2: Creux de tension de 80%

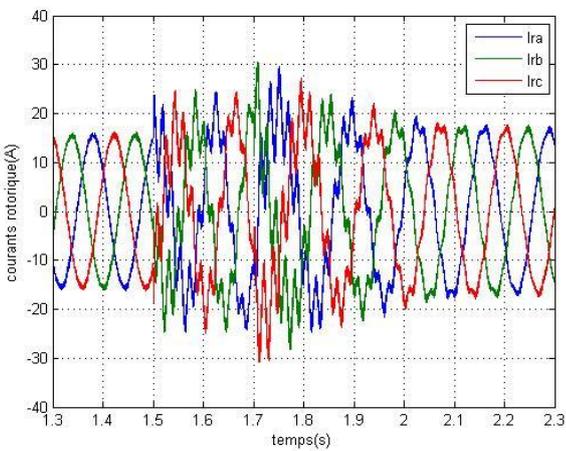


- a -

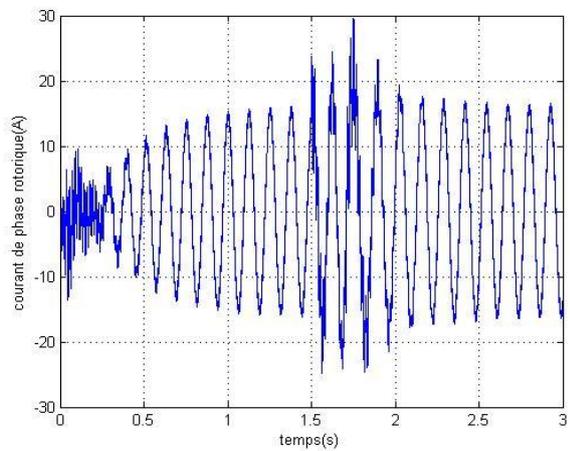


- b -

Figure 0-3: Les courants statorique durant le creux de tension  
(a) : courant des trois phases (b) : courant d'une phase



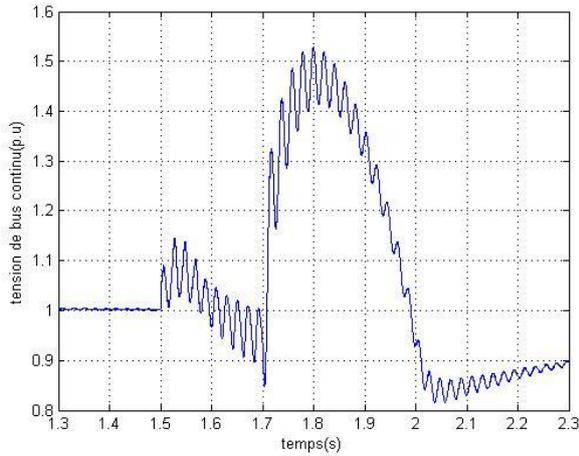
- a -



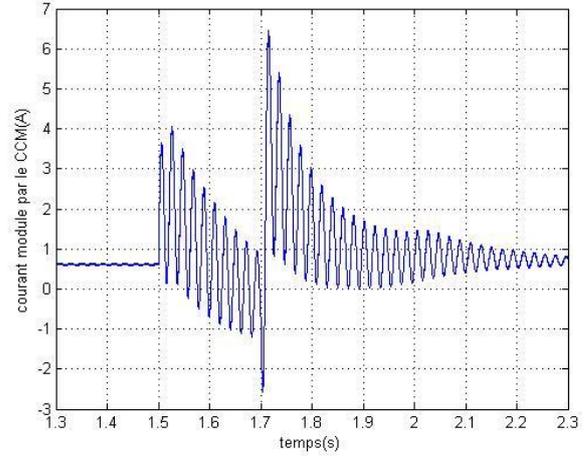
- b -

Figure III-4: Les courants rotoriques durant le creux de tension

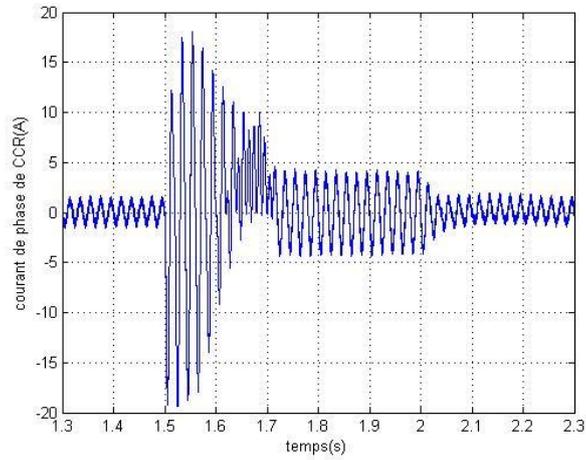
(a) : courant des trois phases (b) : courant d'une phase



- a -



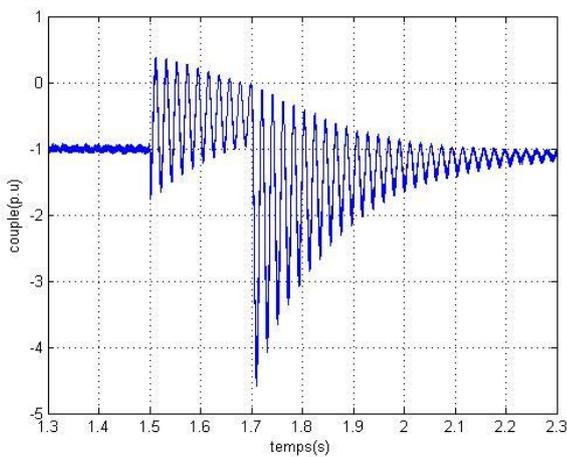
- b -



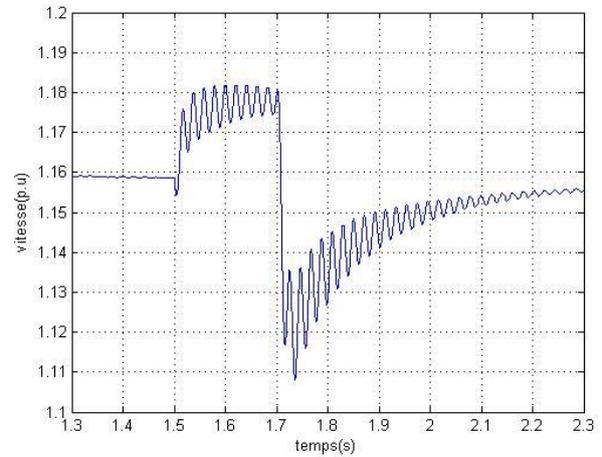
- c -

Figure III-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

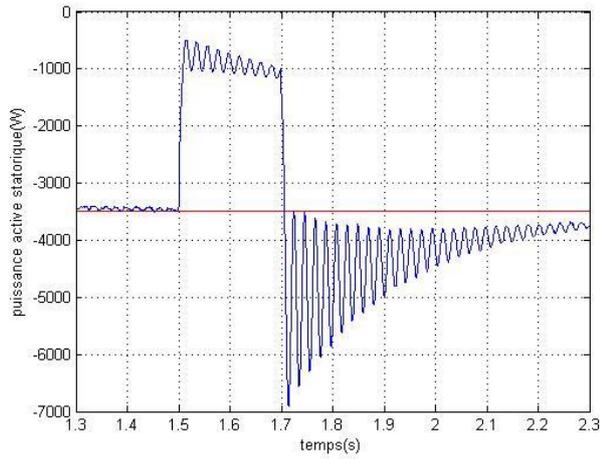


- a -

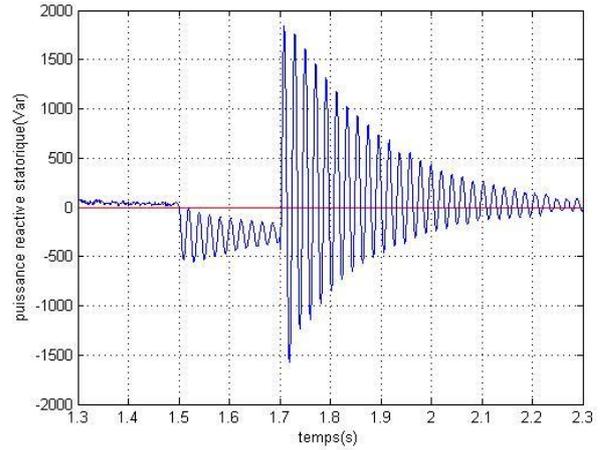


- b -

Figure -0-6: La vitesse et le couple électromagnétique durant le creux de tension  
(a) : le couple (b) : la vitesse

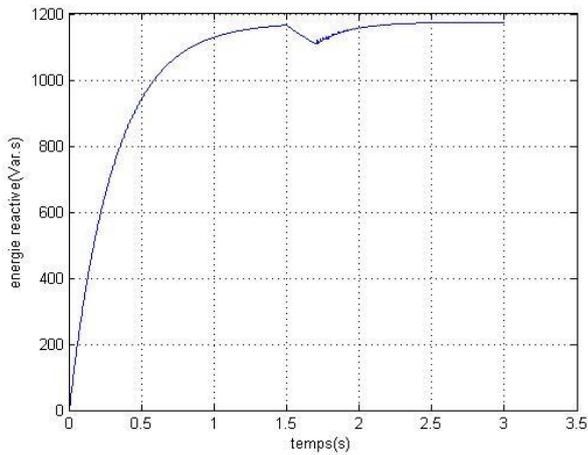


- a -

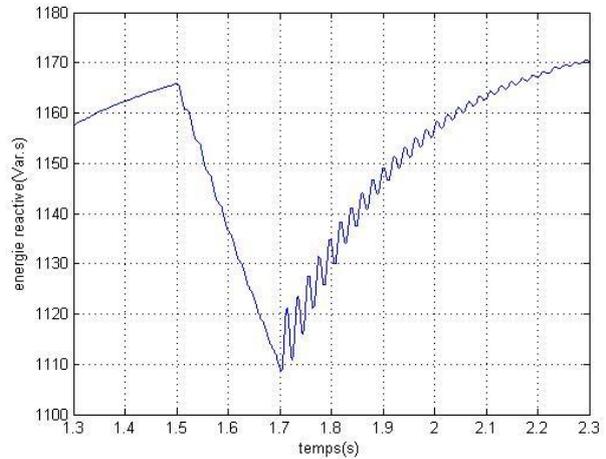


- b -

Figure-0-7: Puissances active et réactive échangées avec le réseau durant le creux de tension (a) : puissance active, (b) : puissance réactive

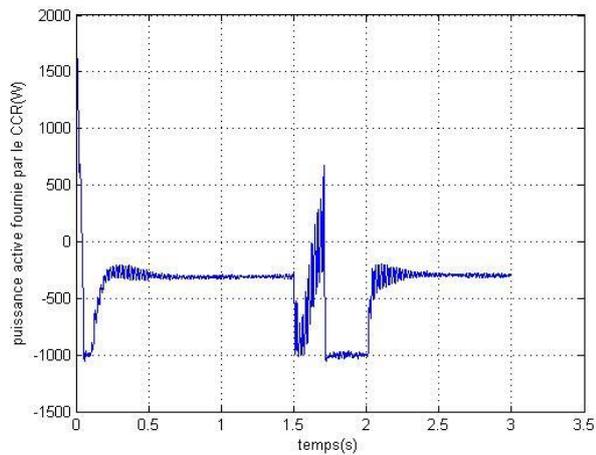


- a -

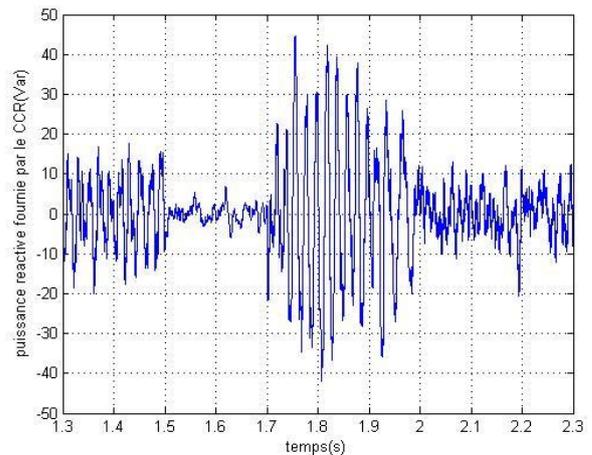


- b -

Figure 0-8: l'énergie réactive durant le creux de tension (a) : énergie réactive, (b) : zoom sur l'énergie réactive



- a -



- b -

Figure-0-9: puissances active et réactive échangées entre le CCR et le réseau durant le creux de tension (a) : puissance active, (b) : puissance réactive

### III.2.2. 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.III-3 et Fig.III-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. III - 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. III -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. III -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 (Fig. III -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. III -9).

### III.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)[24]:

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.

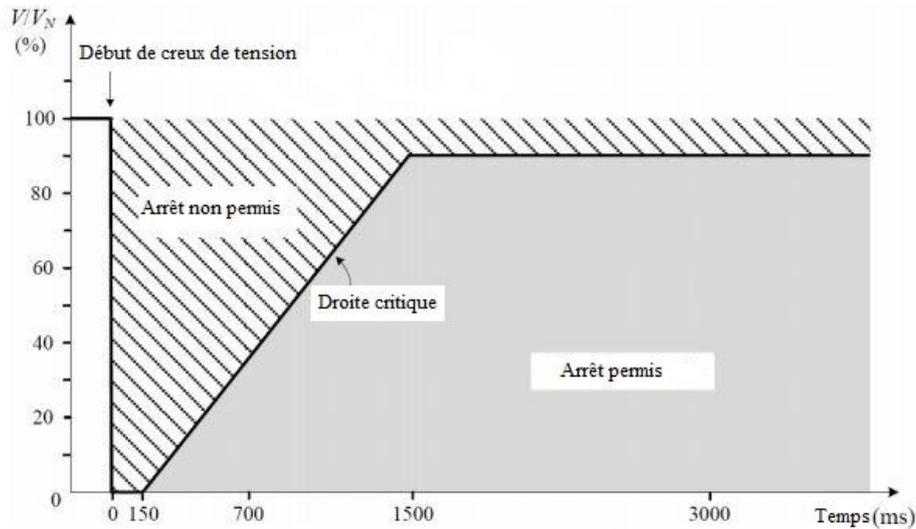


Figure 0-10: Recommandation du Grid code pour le LVRT [24]

### III.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.

#### III.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] :

##### III.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].

##### III.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 classiques 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].

III.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.

III.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.

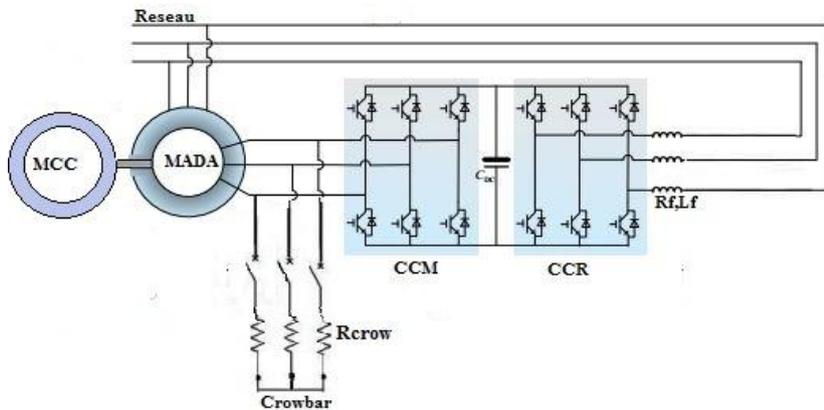


Figure-0-11: Schéma de principe de protection par crowbar [14]

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

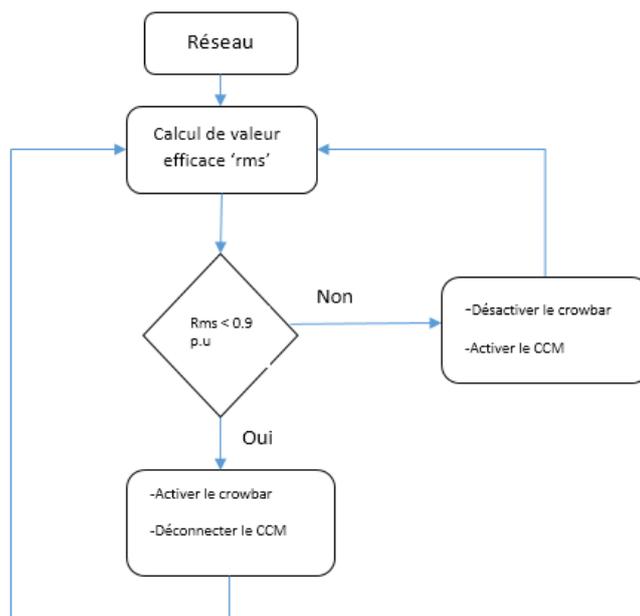


Figure 0-12: Organigramme illustrant la technique de commande de crowbar

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.

### III.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.

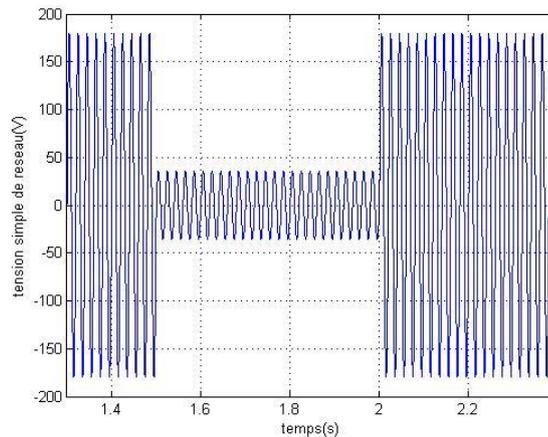
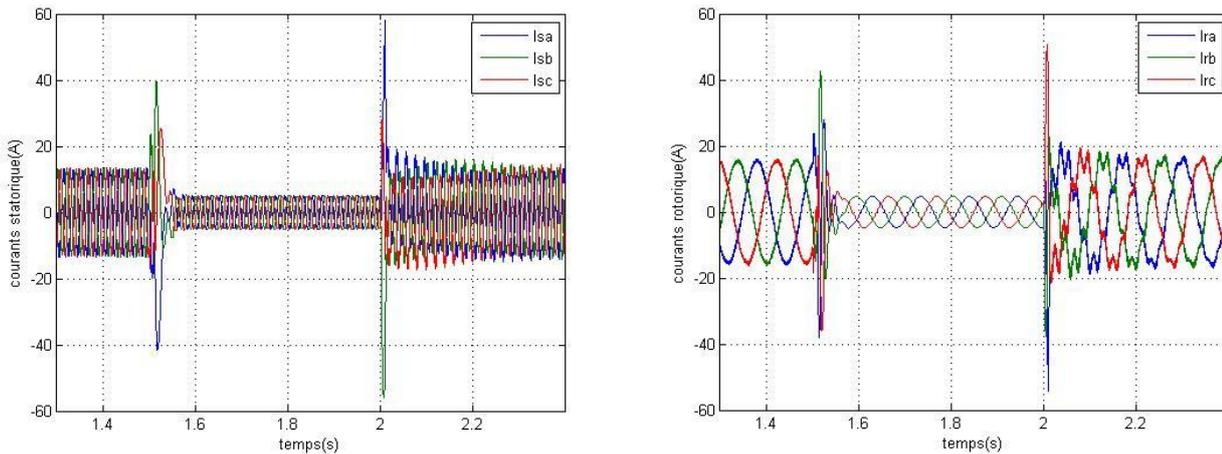


Figure -0-13: Creux de tension de 80%

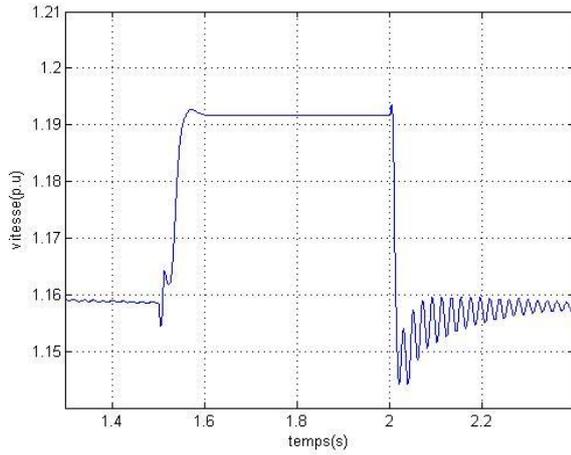
➤ **Résistance Crowbar = Résistance rotorique ( $R_{crow}=1.R_r$ )**



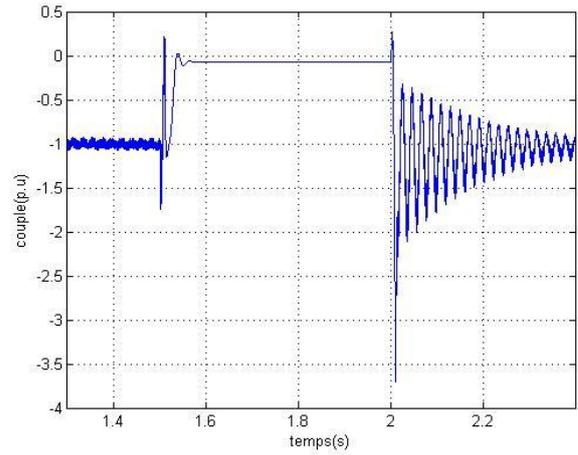
- a -

- b -

Figure-0-14: Courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar  
(a) : courants statoriques, (b) : courants rotoriques

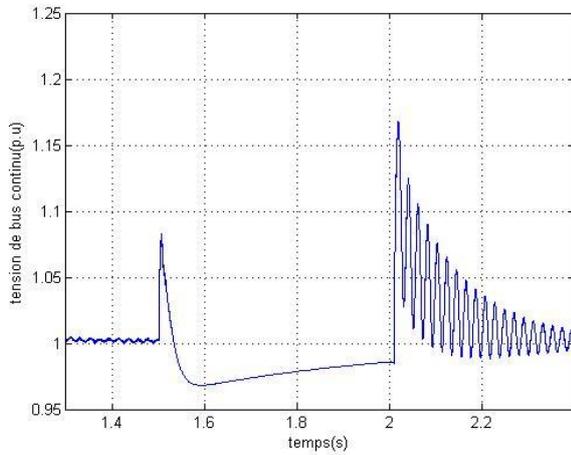


- a -

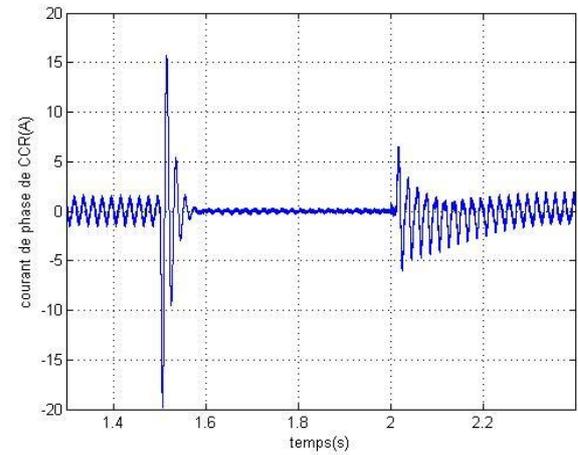


- b -

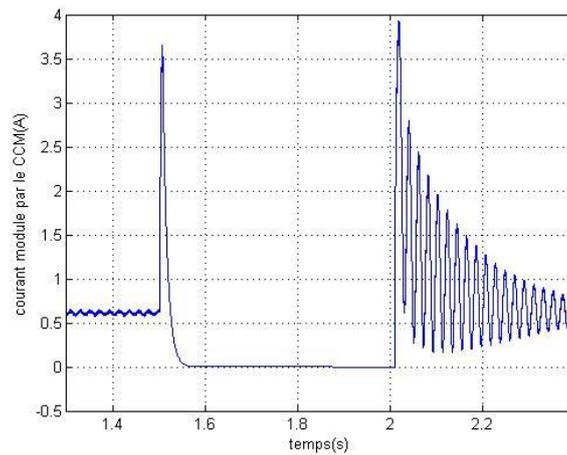
Figure -0-15: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar  
(a) : vitesse, (b) : couple électromagnétique



- a -

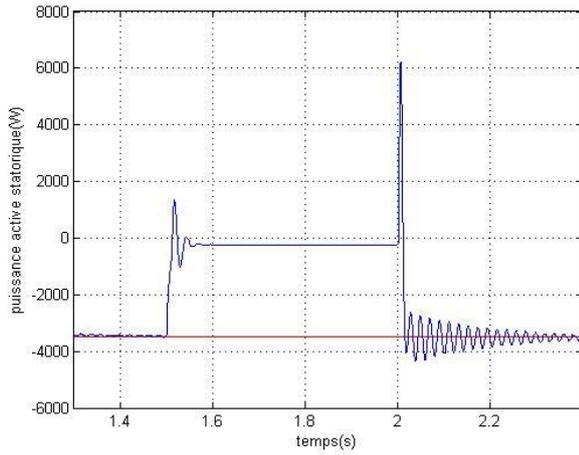


- b -

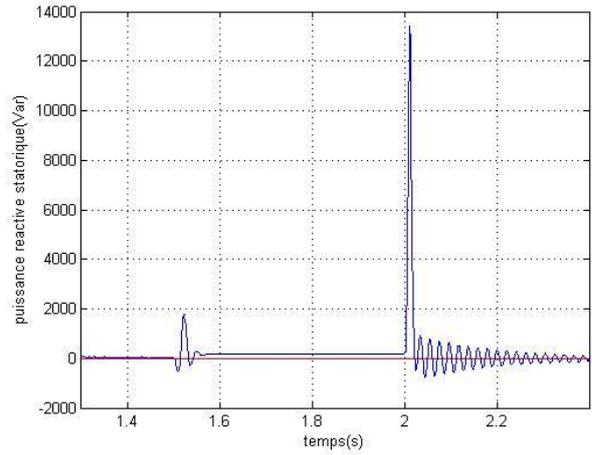


- c -

Figure -0-16: 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

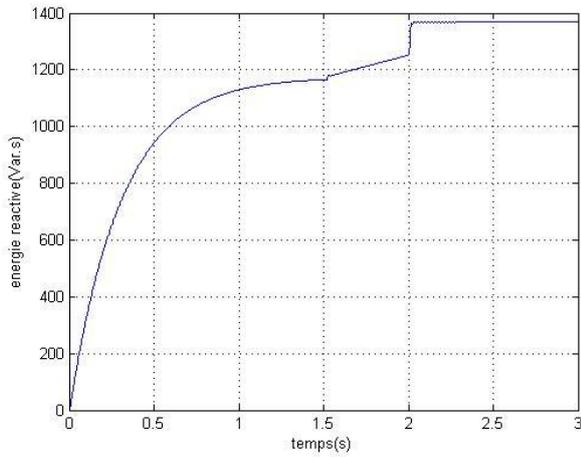


- a -

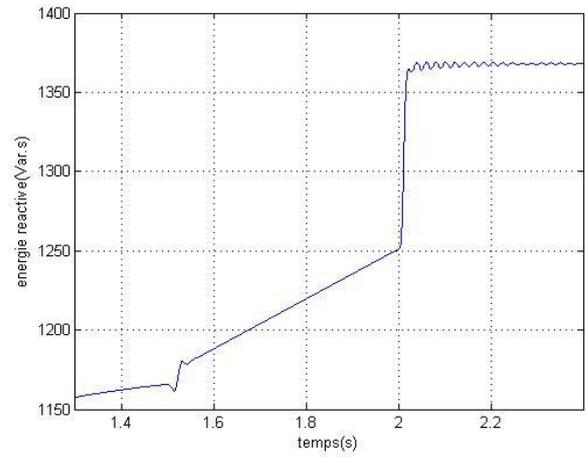


- b -

Figure 0-17: Puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar  
(a) : puissance active, (b) : puissance réactive



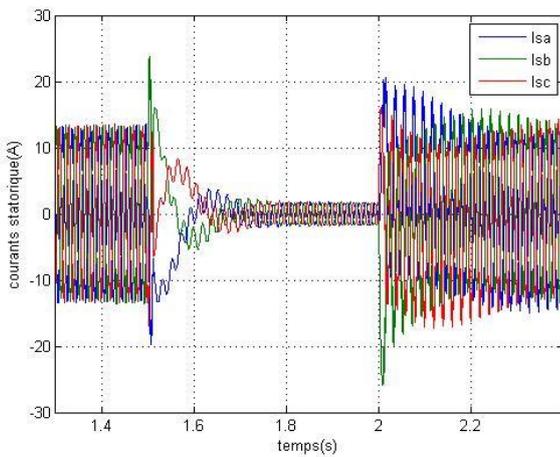
- a -



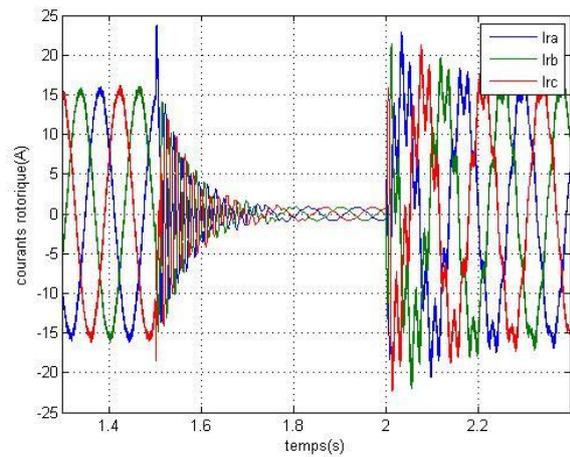
- b -

Figure 0-18: l'énergie réactive avec protection crowbar  
(a): énergie réactive, (b) : zoom sur l'énergie réactive

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

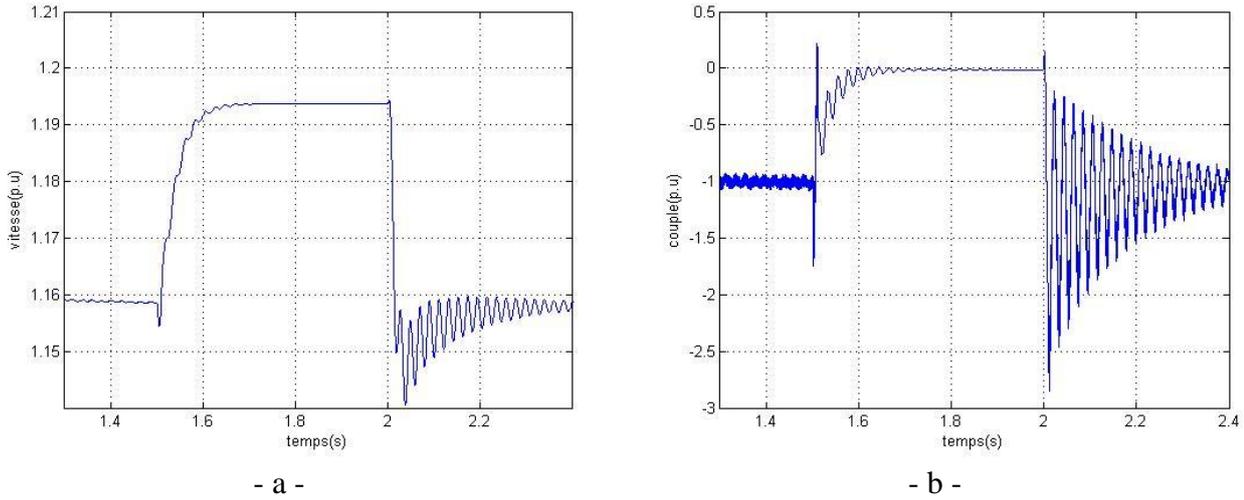


- a -

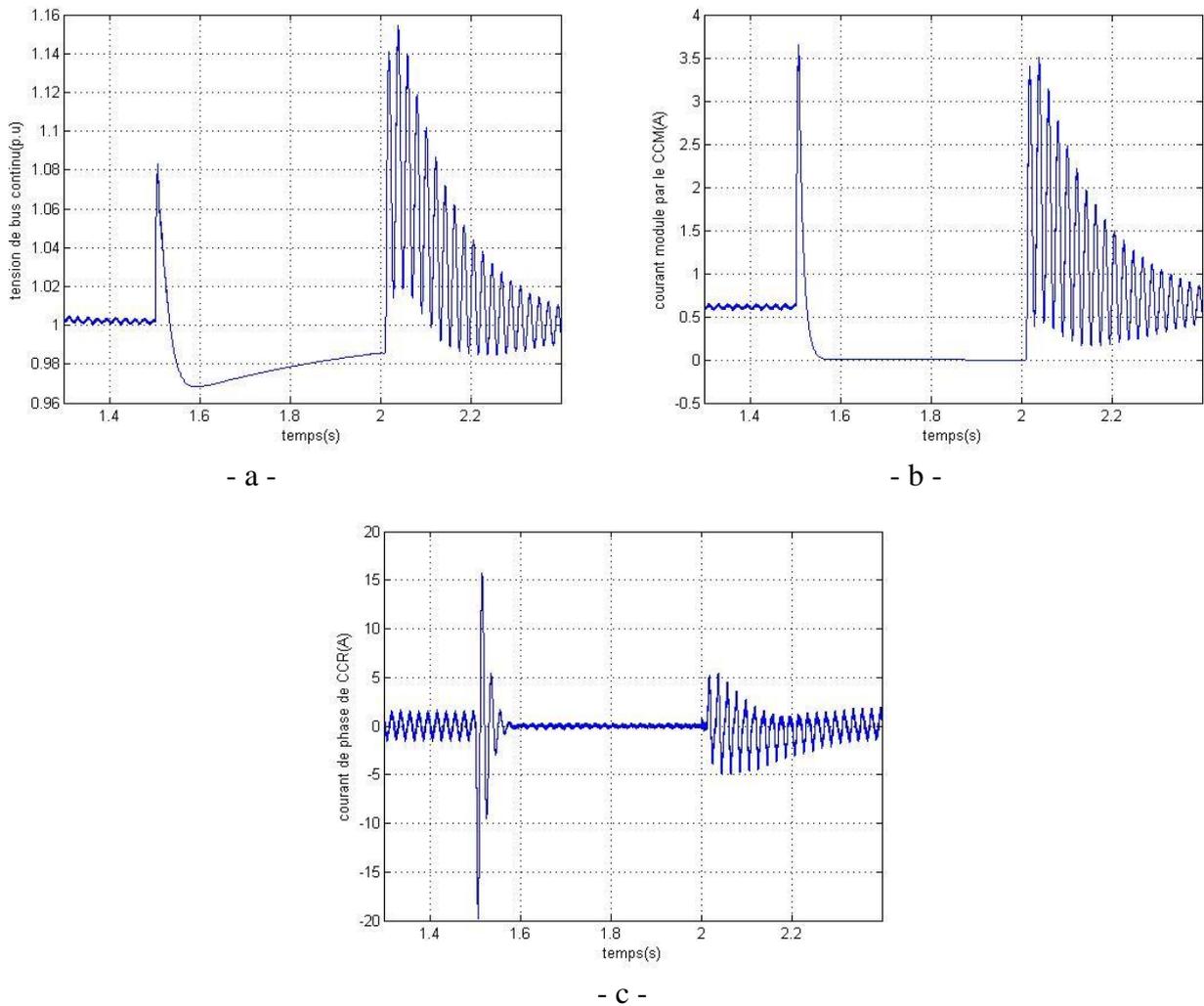


- b -

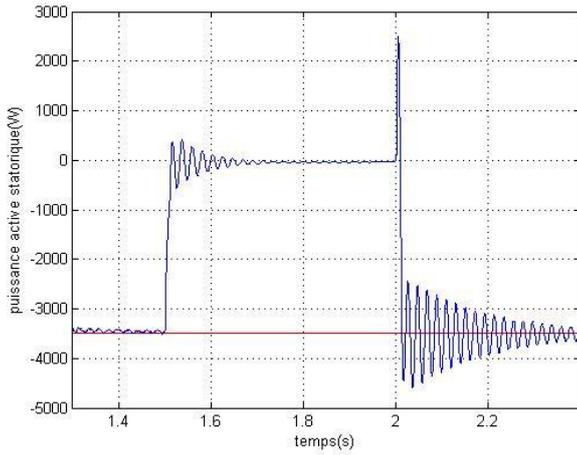
Figure 0-19: courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar  
(a) : courants statoriques, (b) : courants rotoriques



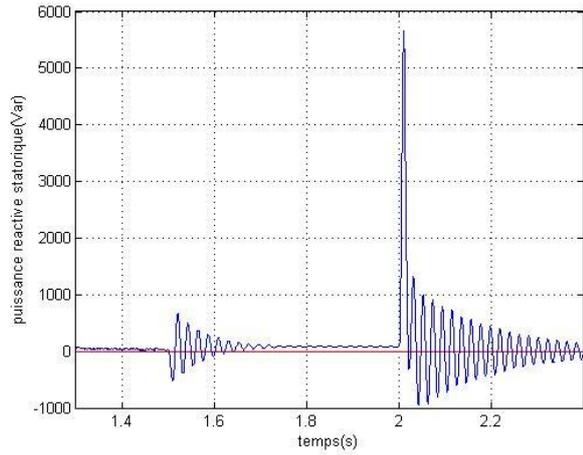
- a - - b -  
 Figure 0-20: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar  
 (a) : vitesse, (b) : couple électromagnétique



- a - - b - - c -  
 Figure 0-21: 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

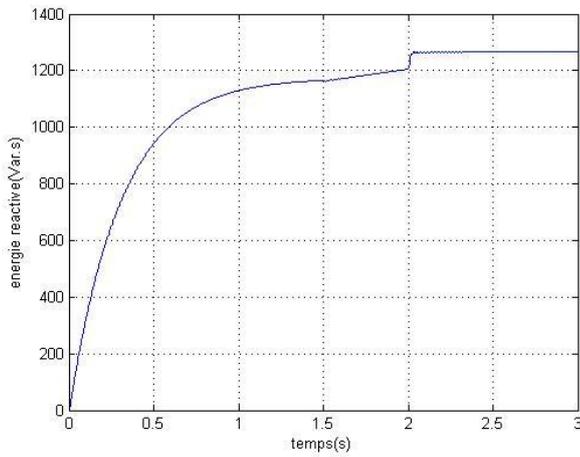


- a -

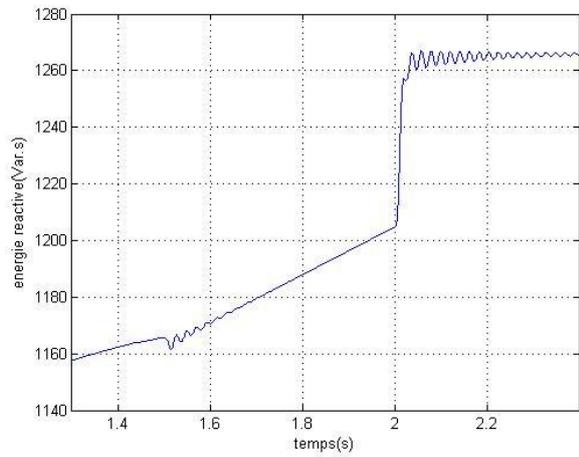


- b -

Figure 0-22: puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar  
(a) : puissance active, (b) : puissance réactive



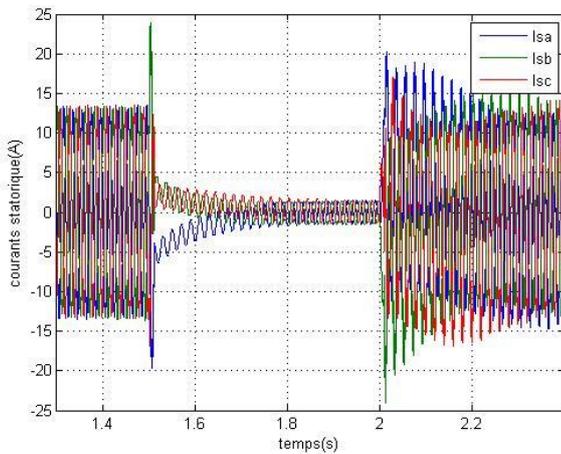
- a -



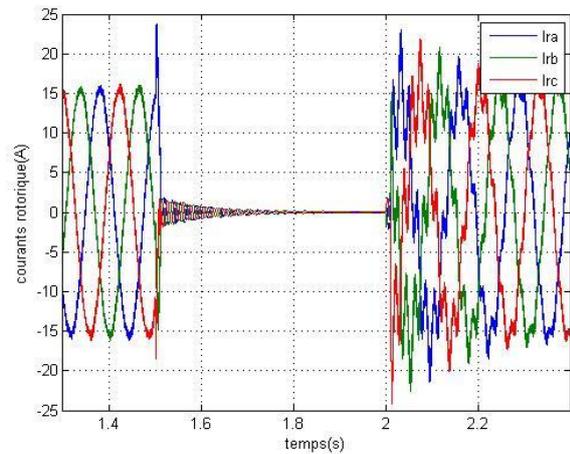
- b -

Figure 0-23: l'énergie réactive avec protection crowbar  
(a): énergie réactive, (b) : zoom sur l'énergie réactive

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

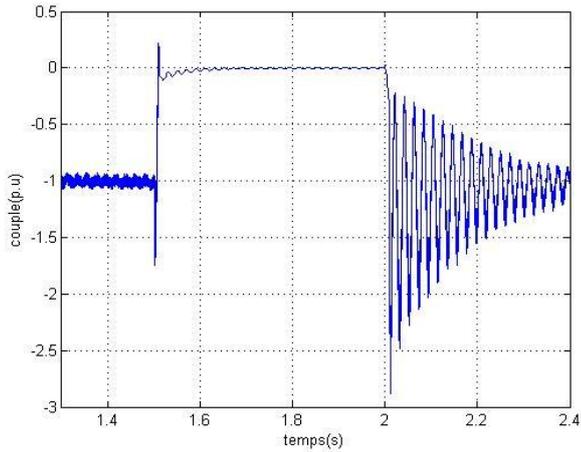


- a -

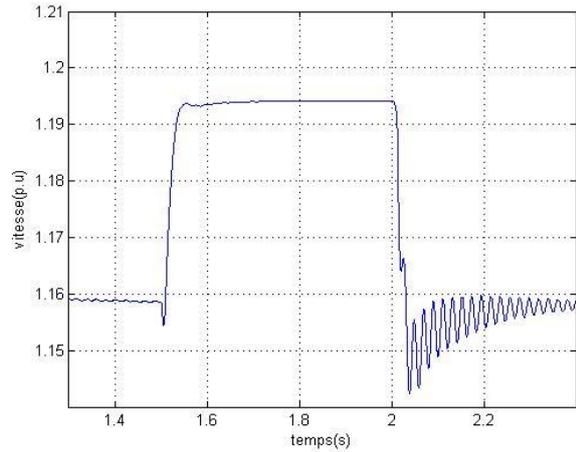


- b -

Figure 0-24: Courants statoriques et rotoriques avec protection crowbar  
(a) : courants statoriques, (b) : courants rotoriques

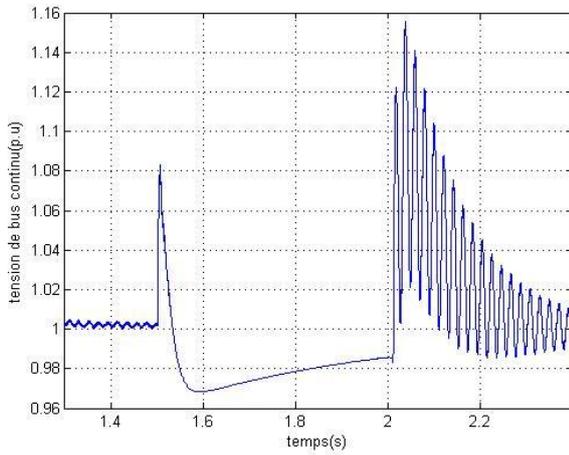


- a -

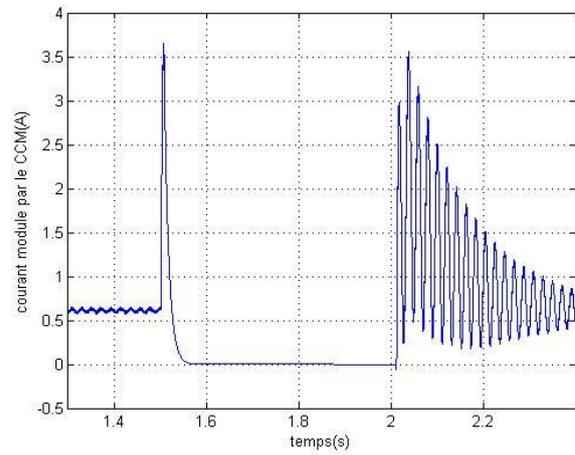


- b -

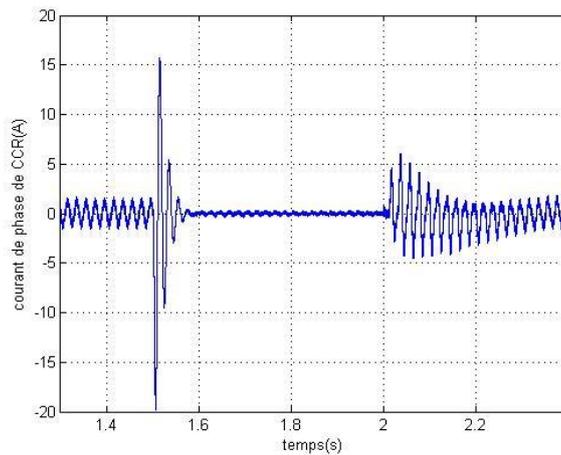
Figure-0-25: Vitesse et couple électromagnétique avec protection crowbar  
(a) : vitesse, (b) : couple électromagnétique



- a -

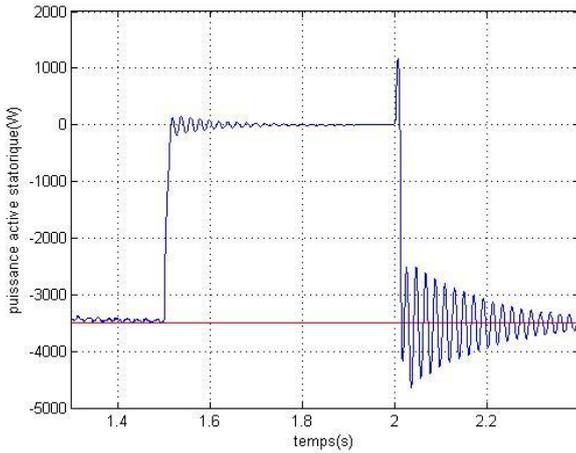


- b -

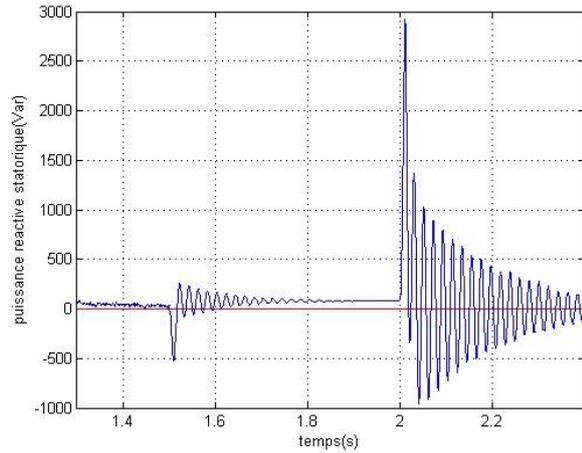


- c -

Figure 0-26: 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

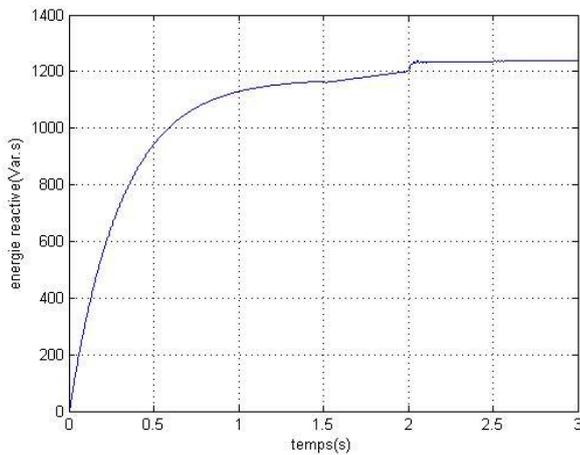


- a -

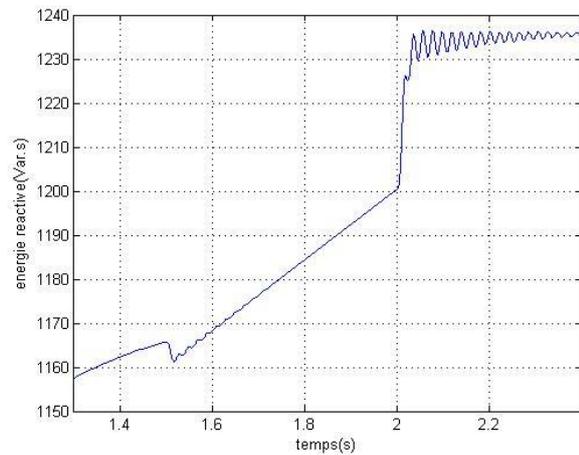


- b -

Figure 0-27: Puissances active et réactive statoriques avec protection crowbar  
(a) : puissance active, (b) : puissance réactive



- a -



- b -

Figure 0-28: l'énergie réactive  
(a): énergie réactive, (b) : zoom sur l'énergie réactive

#### III.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.III-14, Fig. III -19, Fig III -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. III -15, Fig. III -20, Fig. III -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. III -16, Fig. III -21, Fig. III -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. III -17, Fig. III -22, Fig. III -27).

### III.4.3. 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.

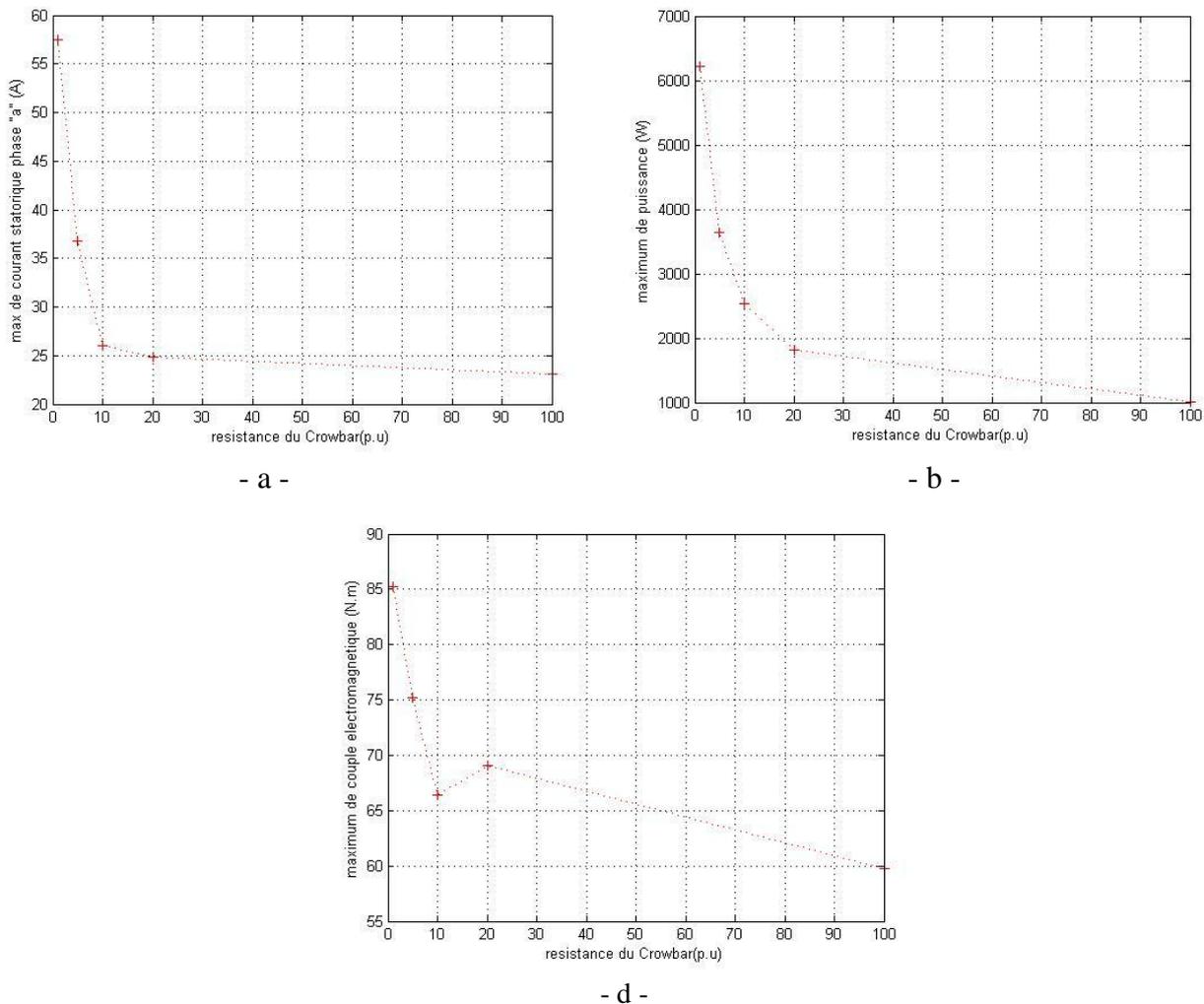


Figure -0-29: Evolution des pics des grandeurs de la MADA en fonction de la résistance d'amortissement à l'instant du creux de tension

(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.

### **III.5. 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.

L'augmentation de la valeur de résistance du crowbar diminue les pics au niveau des courants et puissances active et réactive, ce qui diminue la consommation de l'énergie réactive.

## 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.

L'augmentation de la valeur de résistance du crowbar diminue les pics au niveau des courants et puissances active et réactive, ce qui diminue la consommation de l'énergie réactive, donc elle contribue à la stabilité du réseau électrique.

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<sup>e</sup> 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, 9<sup>th</sup> 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.