

République Algérienne Démocratique et Populaire



**Ministère de l'enseignement
supérieur et de la recherche
scientifique**

Université SAAD DAHLEB BLIDA

Faculté des sciences de l'ingénieur

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Envue de l'obtention du diplôme
de Master En Electrotechnique
Option : Machines Electriques

Thème

**DIAGNOSTICS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE
ALIMENTATION EN REGIME DE COURT-CIRCUIT INTEGREE A
UNE CHAINE EOLIENNE**

Présenté par :

MIDJIMBAYE DJASRABE SEVERIN

Encadré par :

Promoteur Dr. KOUCHIH

Promotion :2014/2015

Remerciements

Je tiens, en premier lieu, à exprimer à Monsieur KOUCHIH (Dr. à l'USAADB) toute ma reconnaissance pour m' avoir encadré et suivi ce travail. Je le remercie tout particulièrement pour le caractère formateur et constructif de sa direction.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à Monsieur N.BOUMALHA pour avoir bien voulu Co-encadrer le présent travail. Qu'il trouve ici toute ma gratitude pour le temps qu'il a consacré et pour ses conseils et orientations.

Je tiens à remercier les membres du jury qui m' ont fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail.

Je remercie vivement Monsieur R. HACHELAF, Mr.BELAZOG, ainsi que Madame MERRAOUI,pour les meilleures formations que j'ai reçues auprès d'eux dès lors de meme pour d'autres.

Merci à toute personne qui m'a apporté son aide,I gotta be missing you very much men.

DEDICACE

MIDJIMBAYE DJASRABE SEVERIN

2014-2015



ALL THE BEST,I THANK U INFINITELY FOR EVERYTHING DONE FOR ME .U'VE GIVEN ME STRENGHT N KNOWLEDGES TO UNDERSTAND THINGS,GET THEM DONE EVERY YEAR AND NOW I CAME TO AN END AS PLANNED.I WANNA BE THANKING SO MUCH MY MOTHER N DAD,ALL FAMILY,PARENTS AND FRIENDS FOR HELPING ME WITH WHATEVER THEY GET.I THANK HUGELY ALGERIAN NATION FOR WELCOMING ME BRINGING ME TO KNOW WHAT I EVER WANTED,I WILL NEVER FORGET ABOUT IT.

Résumé : Ce travail traite la modélisation, le contrôle et la simulation d'un système de conversion électromécanique à base d'une machine à double alimentation connectée directement au réseau et pilotée par son rotor via un convertisseur statique contrôlé par la technique de MLI calculé. L'idée, consiste à implémenter un système de contrôle découplé des puissances actives et réactive générées par le stator de la machine, afin d'assurer de hautes performances et une meilleure exécution. On intègre le système machine asynchrone a double alimentation-convertisseur statique dans une turbine éolienne, Afin de maximiser sa puissance extraite, la méthode MPPT (Maximum Power Point Tracking) est mise en oeuvre pour obtenir la référence de la puissance active au stator relative à la puissance maximale fournie par l'éolienne pour un régime du vent. La deuxième partie de ce travail est consacrée aux diagnostics de la MADA en présence des défauts de court-circuit Connectée à une chaine éolienne et la performance de cette commande.

Mots - clés: machine asynchrone à double alimentation, convertisseur matriciel, Stratégie de modulation MLI calculée, commande par découplage des puissances actives et réactive, éolien, MPPT.

Abstract : This work treats modeling, the control and the simulation of an electromechanical conversion system of electrical energy containing a double fed induction machine connected directly to the grid by the stator and controlled by its rotor via a matrix converter controlled by technique MLI to calculate. The idea consists in implementing a control system uncoupled from the powers active and reactive power generated by the stator of the machine, in order to ensure of high efficiencies and a better execution. One integrate the system double fed induction machine-matrix converter in a Wind turbine, In order to maximize its extracted power, method MPPT (Maximum Power Point Alignment) is implemented to obtain the reference of the active power to the stator relating to the maximum power provided by the wind mill for a mode of the wind. The second part of this work's been devoted on DFIG diagnosis knowing short-circuit faults then being connected to a wind channel and a performant command over.

Key- words: Double fed induction machine, matrix converter, Strategy of calculated modulation PWM, order by decoupling of the active and reactive power, wind, MPPT.

Liste des Figures

Chapitre I

<i>Figure (I.1).</i> La production mondiale d'électricité en 2012.....	(4)
<i>Figure(I.2).</i> Principe de conversion d'énergie.....	(8)
<i>Figure(I.3).</i> Type de montage de la voilure.....	(10)
<i>Figure (I.4).</i> Les éoliennes à axe horizontal.....	(10)
<i>Figure (I.5).</i> Classification des éoliennes selon leurs gammes de puissances et leurs diamètres.....	(11)
<i>Figure (I.6).</i> Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent.....	(12)
<i>Figure (I.7).</i> Principaux composants d'une éolienne.....	(13)
<i>Figure (I.8).</i> Montage d'un mât tubulaire.....	(13)
<i>Figure (I.9).</i> Tour en treillis métallique.....	(14)
<i>Figure(I.10).</i> La Nacelle.....	(14)
<i>Figure(I.11).</i> Les Pales.....	(15)
<i>Figure(I.12).</i> Le rotor.....	(16)
<i>Figure (I.13).</i> Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes.....	(16)
<i>Figure(I.14).</i> Le multiplicateur.....	(17)
<i>Figure(I.15).</i> L'arbre de transmission.....	(17)
<i>Figure(I.16).</i> Girouette.....	(18)
<i>Figure(I.17).</i> Anémomètre.....	(18)
<i>Figure(I.18).</i> Système d'orientation de la nacelle.....	(18)
<i>Figure(I.19).</i> Système de contrôle (commande).....	(21)
<i>Figure(I.20).</i> La fondation en béton.....	(21)
<i>Figure(I.21).</i> Machine synchrone connectée directement au réseau.....	(22)
<i>Figure(I.22).</i> Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	(23)
<i>Figure(I.23).</i> Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné.....	(23)
<i>Figure(I.24).</i> stator à induction.....	(24)
<i>Figure(I.25).</i> Rotor bobiné.....	(24)
<i>Figure(I.26).</i> Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [20].....	(27)
<i>Figure(I.27).</i> Cascade hypo synchrone.....	(28)
<i>Figure(I.28).</i> Machine asynchrone à double bobinage statorique.....	(28)
<i>Figure(I.29).</i> Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor.....	(29)
<i>Figure (I.30).</i> Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices.....	(30)
<i>Figure(I.31).</i> Coupe d'une machine asynchrone à rotor bobine (standard).....	(31)
<i>Figure(I.33).</i> Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.....	(32)
<i>Figure(I.34).</i> Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais.....	(33)
<i>Figure(I.35).</i> Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [19].	(35)

Liste des Figures

<i>Figure(I.36).</i> Architecture d'un système d'entraînement à vitesse variable.....	(38)
<i>Figure(I.37).</i> Evolution de la configuration électrique.....	(40)
Figure(I.38). Représentation des différents défauts statoriques possibles.....	(40)
Figure(I.39): Représentation de l'excentricité statique et dynamique.....	(40)
<i>Chapitre II</i>	
<i>Figure (II.1).</i> Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.....	(46)
<i>Figure(II.2).</i> Passage du triphasé au biphasé La matrice de transformation est définie par :.....	(48)
<i>Figure(II.3).</i> Reponse de la vitesse mecanique alimentée par le reseau.....	(52)
<i>Figure(II.4).</i> reponse de l'angle mecanique par le reseau.....	(52)
<i>Figure (II.5).</i> Reponse du couple electromagnetique par le reseau.....	(53)
<i>Figure (II.6).</i> les tensions réelles statoriques par le reseau	(53)
<i>Figure (II.7).</i> Flux statorique réels par le reseau	(54)
<i>Figure.(II.8)</i> les courants reels statoriques par le reseau	(54)
<i>Figure (II.9).</i> les courants reels rotoriques par le reseau	(55)
<i>Figure (II.10).</i> tensions reelles rotoriques par le reseau	(55)
<i>Figure (II.11).</i> puissance active statorique par le reseau.....	(56)
<i>Figure(II.12).</i> L'onduleur de tension associé à La machine	(57)
<i>Figure (II.13).</i> les tensions de reference et la porteuse.....	(60)
<i>Figure (II.14).</i> bras des interrupteurs	(60)
<i>Figure(II.15).</i> Principe de la commande PWM- intersective	(61)
<i>Figure (II.16).</i> reponse de la vitesse mecanique alimentee par l'ondileur	(61)
<i>Figure (II.17).</i> couple electromagnetique alimente par MLI	(62)
<i>Figure (II.18).</i> tensions de park rotoriques a la sortie de MLI	(62)
<i>Figure (II.19)</i> courants reels statoriques en presence de MLI	(63)
<i>Figure (II.20).</i> flux statoriques reels en presence de PWM	(63)
<i>Figure (II.21).</i> flux de parck en presence de PWM	(64)
<i>Figure (II.22).</i> Schéma de principe d'un redresseur PWM.....	(65)
<i>Figure (II.23).</i> schema fonctionnel d'un redresseur PWM	(67)
<i>Figure (II.24).</i> Redresseur MLI triphasé et sa commande.....	(68)
<i>Figure (II.25).</i> Principe du Contrôle par hystérésis.....	(69)
<i>Figure(II.26).</i> Modulateur MLI à bande d'hystérésis.....	(70)
<i>Fig.(II.27).</i> La tension du bus continu.....	(70)
<i>Fig(II.28)</i> .couple et vitesse en presence du bus continu.....	(70)
<i>Fig(II.29)</i> .les courants reels statoriques en presence du bus continu.....	(71)

Liste des Figures

Fig(II.30).les flux de parck statoriques apres bus.....	(71)
Fig(II.31).les flux reels statoriques en presence du bus.....	(72)

Chapitre III

<i>Figure (III.1).</i> Vitesse du vent V et la vitesse tangentielle (ΩR).....	(77)
<i>Figure (III.2).</i> Caractéristique de la turbine éolienne.....	(77)
<i>Figure (III.3).</i> Modèle mécanique de la turbine éolienne.....	(78)
<i>Figure (III.4).</i> Le schéma bloc du modèle de la turbine.....	(79)
<i>Figure (III.5).</i> Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.....	(80)
<i>Figure (III.6).</i> Orientation du flux statorique.....	(84)
<i>Figure (III.7).</i> Schéma bloc de la MADA.....	(87)
<i>Figure (III.8).</i> Schéma bloc de la commande directe.....	(88)
<i>Figure (III.9).</i> Système régulé par un PI.....	(89)
<i>Figure(III.10).</i> Schéma structurel du système éolien global.....	(91)
<i>Fig. (III.11).</i> Le profil du vent.....	(91)
<i>Fig. (III.12)</i> : La vitesse de rotation.....	(91)
<i>Fig. (III.13)</i> : La puissance aérodynamique et la Puissance active statorique mesurée.....	(92)
<i>Fig. (IV.14)</i> : Le facteur de puissance.....	(92)
Fig(III.15) : pce active rotorique mesuré en commande indirecte.....	(92)
Fig(III.16) : pce reactive rotorique mesuré en commande indirecte.....	(92)
Fig(III.17) : couple mécanique.....	(92)
Fig(III.18) : couple de la turbine.....	(92)
Fig(III.19) : courants rotoriques réels et mesurés.....	(93)
Fig(III.20) : courants de parck statoriques.....	(93)
Fig(III.21) : tension de parck rotoriques.....	(93)
Fig(III.22) : courants statoriques réels.....	(93)
Fig(III.23) : les flux statoriques réels.....	(93)
Fig(III.24) : les flux de parck rotoriques.....	(93)
Fig(III.25) : les flux rotoriques réels.....	(94)
Fig(III.26) : les tensions rotoriques réelles.....	(94)
Fig(III.27) : courant redressé.....	(94)
Fig(III.28) : les tensions rotoriques de référence et la porteuse.....	(94)

CHAPIV

Fig(IV.1): Représentations des trois enroulements statoriques d'une MADA avec court-circuit entre spires dans la phase 'a'.....	(100)
Fig(IV.2) : vitesse mécanique de la machine.....	(100)
Fig(IV.3) : couple électromagnétique de la machine.....	(100)

Liste des Figures

Fig(IV.4) :courant de défaut.....	(100)
Fig(IV.5) :les courants reels statoriques.....	(100)
Fig(IV.6) :les courants de parck statoriques.....	(100)
Fig(IV.7) :les flux de parck rotoriques.....	(101)
Fig(IV.8) :les tensions statoriques.....	(101)
Fig(IV.9) :courants rotoriques reels	(101)
Fig(IV.10)vitesse de la turbine.....	(102)
Fig(IV.11) :vitesse de rotation mecanique de l'arbre.....	(102)
Fig(IV.12) :courant de defaut et flux de defaut.....	(102)
Fig(IV.13) :courants statoriques real.....	(103)
Fig(IV.14) :courants rotoriques real mesures	(103)
Fig(IV.15) :courants rotoriques et referances.....	(103)
Fig(IV.16) :facteur de puissance	(103)
Fig(IV.17):puissance earodynamique et pce active statoriq mesure en commande directe....	(103)
Fig(IV.18):puissance active mesure en commande en indirecte.....	(104)
Fig(IV.19)puissance reactive mesure en command indirect.....	(104)
Fig(IV.20):courants de park statoriques.....	(104)
Fig(IV.21):tensions rotoriques de parck.....	(104)
Fig(IV.22):tensions rotoriques real	(104)
Fig(IV.23):courants statoriques real.....	(104)
Fig(IV.24):courants de park rotoriques et statoriques.....	(104)
Fig(IV.25):flux real statoriques	(105)
Fig(IV.26):flux real rotoriques	(105)

Liste des Figures

Liste des Figures

REMERCIEMENT

DIDECACE

RESUME

LISTE DES ACRONYSMES ET ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

SOMMAIRE :

Introduction générale.....	(1)
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DES SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE	
I.1. Introduction.....	(3)
I.2. Impact des énergies renouvelables sur l'environnement.....	(3)
I.2.1. Energies renouvelables, définitions, ressources et exploitation.....	(3)
I.2.1.1. Energies renouvelables.....	(3)
I.2.1.2. Energies renouvelables dans le monde.....	(4)
I.2.1.3. Energie hydraulique.....	(4)
I.2.1.4. Energie solaire.....	(5)
I.2.1.4.1. Energie solaire photovoltaïque.....	(5)
I.2.1.4.2. Energie solaire thermique.....	(5)
I.2.1.5. Energie géothermie.....	(6)
I.2.1.6. Energie de la biomasse.....	(6)
I.2.1.7. Energie éolienne.....	(6)
I.3. Etat de l'art de l'éolien.....	(7)
I.3.1. Historique de l'éolien.....	(7)
I.3.2. Définition De l'énergie éolienne.....	(7)
I.3.3. Principe de fonctionnement.....	(8)
I.3.4. Classification des éoliennes.....	(8)
I.3.4.1. Par rapport à leurs axes.....	(8)
I.3.4.1.1. Eoliennes à axe vertical.....	(9)
I.3.4.1.1a. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical.....	(9)
I.3.4.1.2. Eoliennes à axe horizontal.....	(9)
I.3.4.1.2c. Eoliennes rapides.....	(10)
I.3.4.1.2d. Eoliennes lentes.....	(10)

Table des mats

I.3.4.1.2e. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal.....	(10)
I.3.4.2. Par rapport à leurs gammes de puissances et leurs diamètres.....	(11)
I.3.4.2.1. Régulation de la puissance d'une éolienne.....	(11)
I.3.4.2.1a. Régulation mécanique.....	(12)
I.3.4.2.1b. Régulation électrique dans le but de maximiser l'énergie captée.....	(12)
I.3.5. Principaux composants d'une éolienne.....	(12)
I.3.5.1. La tour (mat).....	(13)
I.3.5.2. La nacelle.....	(13)
I.3.5.3. Les pales.....	(14)
I.3.5.4. Le rotor.....	(14)
I.3.5.4a. Les rotors à vitesse fixe.....	(15)
I.3.5.4b. Les rotors à vitesse variable.....	(15)
I.3.5.4c. Intérêts de la vitesse variable.....	(15)
I.3.5.5. Frein.....	(15)
I.3.5.6. La génératrice.....	(16)
I.3.5.7. Le multiplicateur.....	(16)
I.3.5.8. L'arbre de transmission.....	(16)
I.3.5.9. Le système de refroidissement.....	(17)
I.3.5.10. Les outils de mesure du vent.....	(17)
I.3.5.10a. Anémomètre.....	(17)
I.3.5.11. Système d'orientation de la nacelle.....	(17)
I.3.5.12. Système de contrôle (commande).....	(18)
I.3.5.13. La fondation en béton.....	(18)
I.3.6. Protection contre la corrosion.....	(18)
I.3.7. Avantage et inconvénients de l'énergie éolienne.....	(19)
I.3.8. L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains.....	(20)
I.4. Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne.....	(20)
I.4.1. Types de machines électriques.....	(20)
I.4.1.1. Générateur synchrone.....	(20)
I.4.1.2. Générateur asynchrone.....	(21)
I.4.1.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	(21)
I.4.1.2.2. Machine asynchrone à double alimentation.....	(22)
I.5. Etat de l'art de la MADA.....	(22)
I.5.1. Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	(22)
I.5.2. Structure des machines asynchrones à double alimentation.....	(23)
I.5.2.1. Doubles alimentations par le stator.....	(24)
I.5.2.2. Double alimentation par le stator et le rotor.....	(25)
I.5.3. Classification des machines asynchrone à double alimentation.....	(26)

I.5.3.1 Machine asynchrone à double alimentation a rotor bobiné.....	(27)
I.5.3.2. Machine asynchrone à double alimentation en cascade asynchrone.....	(28)
I.5.3.3. Machine asynchrone à double alimentation sans balais.....	(29)
I.5.4. Comparaison entre les différentes variantes de Machine asynchrone A double alimentation	(30)
I.5.5. Mode de fonctionnement de la MADA.....	(31)
I.5.5.1. Fonctionnement à vitesse variable.....	(31)
I.5.5.2. Fonctionnement à vitesse fixe.....	(33)
I.5.6. Domaine d'application de la Machine asynchrone à double alimentation.....	(33)
I.5.6.1. Dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable.....	(33)
I.5.6.2. Dans les systèmes de génération éolienne à vitesse variable.....	(34)
I.5.6.2.1. Application de la MADA dans les systèmes éoliens.....	(35)
I.5.6.2.2.Type de machine électrique utilisée.....	(35)
I.5.7. Intérêt de la MADA.....	(36)
I.5.8. Avantages et inconvénients de la MADA.....	(37)
I.6.Generalites des defauts de MAS.....	(37)
I.6.1. INTRODUCTION.....	(37)
I.6.2. Cause des défauts.....	(38)
I.6.3. Présentation des défauts	(38)
I.6.3.1. Défauts affectant le stator.....	(38)
I.6.3.2. Défauts affectant le rotor	(39)
I.6.3.2.1. Rotor à cage d'écurueil.....	(39)
I.6.3.2.1.1. Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique	(39)
I.6.3.2.1.2. Défaut de roulements	(40)
I.6.3.2.2. Rotor bobiné	(41)
I.6.3.2.2.1 Défaut de courts-circuits	(41)
I.6.3.2.2.2 Défaut de contact balai - bague	(41)
I.6.3.3. Méthodes de diagnostic utilisées pour détecter les défauts de la machine... ..	(41)
I.6.3.3.1 Analyse des courants.....	(41)
I.6.3.3.1.1. Défaut de barres rotoriques.....	(41)
I.6.3.3.2 L'analyse du vecteur de Park	(42)
I.6.3.3.3 Analyse spectrale de la puissance instantanée statorique	(42)
I.6.3.3.4 Estimation paramétrique	(42)
I.6.3.3.5 Reconnaissance des formes	(42)
I.6.3.3.6 Analyse temps-fréquence et temps-échelle	(43)
I.6.3.3.6.1 Analyse temps-fréquence	(43)
I.7. Conclusion.....	(43)

CHAPITRE II : Modelisation de MADA associée aux Convertisseurs

1.INTRODUCTION.....	(44)
II. 2.Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	(44)
II.2.1.Hypothèses simplificatrices.....	(45)
II.2.2.Equations électriques de la machine.....	(46)
II.2.3.Equations mécaniques de la machine.....	(48)
II.2.4.Modèle de la MADA dans le repèredq.....	(48)
II.2.4.1. La transformation de Park.....	(48)
II.2.4.2. Modélisation de la MADA dans le repère de PARK.....	(49)
II.2.4.3. Choix de la référence.....	(50)
II.2.4.3.1. Référentiel lié au stator ($\theta_s = 0$).....	(50)
II. 2.4.3.2. Référentiel lié au rotor($\theta_r = 0$).....	(50)
II.2.4.3.3. Référentiel lié au champ tournant.....	(50)
II. 2.4.4. MISE SOUS FORME D'EQUATIONS D'ETAT.....	(51)
II.2.5. Résultat de simulation.....	(51)
II.3. Modélisation de l'onduleur de tension.....	(56)
II.3.1.Modèle mathématique de l'onduleur de tension.....	(57)
II.3.2. La technique de modulation «Sinus-triangle» (STPWM).....	(59)
II.3.3.resultats de similation de l'onduleur.....	(60)
II.4.Modélisation de redresseur MLI à bande hystérésis.....	(65)
II.4.1.Structure générale du redresseur MLI.....	(66)
II.4.2.Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI.....	(66)
II.4.3 Modèle de redresseur MLI.....	(67)
II.4.4.Représentationfonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé.....	(67)
II.4.5.Le récepteur (la charge).....	(68)
II.4.6.Commande de redresseur MLI par hystérésis en courant.....	(69)
II.4.6.1. Principe de commande par hystérésis en courant.....	(69)
II.4.6.2.Résultats de simulation dans du bus et comparaison.....	(71)
II.5.Conclusion.....	(74)

CHAPITRE III : Commande vectorielle de la MADA

III.1.Introduction.....	(75)
III.2.Modélisation de la turbine éolienne.....	(75)
III.3.Hypothèse simplificatrices pour la modélisation de la turbine.....	(75)

III.3.1. Modèle du vent.....	(75)
III.3.2. Modèle aérodynamique.....	(76)
III.3.3. Le coefficient de vitesse réduite (tip-speed ratio).....	(76)
III.3.4. Modèle de la partie mécanique.....	(78)
III.3.4.1. Modèle du multiplicateur de vitesse.....	(79)
III.3.4.2. Modèle de l'arbre.....	(79)
III.3.5. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.....	(80)
III.3.5.1. Maximisation de la puissance extraite MPPT(Maximum power point tracking).....	(81)
III.4. Commande vectorielle par la puissance active et réactive.....	(82)
III.4.1. Principe de la commande vectorielle.....	(82)
III.4.1.1. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	(83)
III.4.1.2. Choix du référentiel pour le modèle diphasé.....	(83)
III.4.2. Commande directe.....	(88)
III.4.3. Mise en place de la régulation.....	(88)
III.4.3.1. Synthèse du régulateur PI.....	(89)
III.5. Résultats de simulation.....	(91)
III.6. Conclusion.....	(94)

CHAPITRE IV : DIAGNOSTIC DE LA MADA EN COURT-CIRCUIT

IV.1. Modélisation de la MADA avec défaut statoriques-rotoriques « court-circuit entre spires.....	(96)
IV.1.1. Modélisation de la MADA avec défaut statoriques « court-circuit entre spires »	(96)
IV.1.2. Modélisation de la MADA avec défaut rotorique « court-circuit entre spires »	(98)
IV.2.1. simulation de la MADA en modèle simple et réel(abc)sans et avec défaut CC.....	(99)
IV.2.2. résultats de simulation de la machine en présence des défauts de court-circuit et connectée à l'éolienne.....	(102)
IV.3. Conclusion.....	(108)
Conclusion générale	(109)
Bibliographie	

Table des mats

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude du diagnostic de la génératrice asynchrone à double alimentation intégré dans le système éolienne pour un fonctionnement sain et avec défaut de court-circuit statorique et rotorique. Les défauts de court-circuit entre spires peuvent apparaître suite à la dégradation des isolants causée par une surintensité ou surtension pendant les commutations du convertisseur induisant ainsi une circulation d'un courant très élevé dans les bobines court-circuitées. Ce type de défaut peut amener aux courts-circuits entre phases ou entre une phase et la terre qui peut être évité par une surveillance permanente de l'état de la génératrice.

Dans le premier chapitre, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée comme beaucoup d'énergies renouvelables. Dans ce contexte, quelques notions principales sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, la conception, les différents types d'éoliennes utilisés, la classification des éoliennes, les avantages et les inconvénients ainsi que les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. Ce qui nous a amené à choisir la machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement. La fin de ce est consacré à une étude générale de la (MADA), ses applications, ses modes de fonctionnement et ses avantages, en suite nous avons les différents défauts apparaissant dès les MAS.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de le simplifier. Ensuite, on a élaboré un modèle de la cascade « convertisseurs-MADA », ces convertisseurs sont un redresseur à MLI de courant côté réseau et un onduleur de tension à MLI côté rotor reliés entre eux par un bus continu.

Le troisième chapitre a été consacré à la commande vectorielle de MADA par orientation de flux statorique Une modélisation nous a permis de simuler un comportement de la MADA saine Intégrée à la chaine el l'observation de sa conduite génératrice, on suppose que la vitesse du vent varie légèrement en régime permanent. Puis, on a déduit les caractéristiques aérodynamiques principales de la turbine. Ensuite, on a développé un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en parlant de la commande vectorielle directe de la MADA à flux statorique orienté. Dans cette partie, nous avons présenté une étude théorique dans

Conclusion generale

laquelle nous avons exprimé les puissances active et réactive statoriques en fonction des courants rotoriques.

Le quatrième chapitre ,nous avons présenté le diagnostic de MADA en présence de défauts de court-circuit en les modélisant .Cette modélisation nous a permis de simuler un comportement des différentes grandeurs électriques, magnétiques et mécaniques pour MADA en mode simple et réel. on a simulé et analysé le modèle de la chaine de conversion d'énergie éolienne lorsque la génératrice connaît ce défaut de court-circuit, une performance des puissances doit satisfaire cette analyse. Les résultats de simulation sont interprétés, la transformée de Fourier rapide (FFT) (Fast Fourier Transform) est exploitée pour l'étude et l'analyse spectrale du courant statorique et par conséquent de déterminer les composantes et les raies caractérisant les défauts le courant statorique. Nous avons pu observer très clair que les variations des grandeurs ne sont pas remarquables pour le domaine temporel.

.

Conclusion generale

Liste des tableaux

<i>Tableau (I.1).</i> Dimensions des aérogénérateurs [13].....	(11)
<i>Tableau (I.2).</i> Classification et comparaison des différentes variantes de la machine à double alimentation.....	(31)
<i>Tableau (I.3).</i> Tableau des différentes génératrices utilisées.....	(33)

m	: La masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor en une seconde
ρ	: La densité de l'air qui est égale à 1.225kg /m ³ a la pression atmosphérique a 15°C.
S	: La surface d'air en m ² balayée par les pales
C_p	: Le coefficient de puissance de la turbine
λ	: La vitesse spécifique
β	: Angle de calage
G	: Gain du multiplicateur
P_{aero}	: Puissance aérodynamique
V	: La vitesse du vent en m/s
R	: La longueur de la pale en m
$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine rad/s
C_{aer}	: Couple aérodynamique
C_g	: Couple issu du multiplicateur
J_t	: l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice
C_{mec}	: Couple mécanique
C_{vis}	: Couple de frottement visqueux
f	: Coefficient de frottement visqueux
C_{em-ref}	: Couple électromagnétique de référence
$C_{aer-estime}$: Couple aérodynamique estime
V_{estime}	: Vitesse du vent estimé
Ω_{mec}	: Vitesse de rotation mécanique
M.P.P.T	: Maximum Power Point Tracking
MAS	: Machine Asynchrone à Cage
MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
MCC	: Machine à Courant Continu
IGBT	: Insulate Gate Bipolar Transistor
F.O.C	: Field-Oriented-Control
MLI	:Modulation de Largeurs d'Impulsions
s, r	: Indice correspondants au stator et rotor
as, bs, cs	: Indice des phases statorique
Ar, Br, Cr	: Indice des phases rotorique
d, q	: Les axes correspondant au référentiel lié au repère de PARK
p	: Nombre de paire de pole

Acronymes et Abreviations

f_s	: La fréquence du réseau
g	: Le glissement
Ω_s	: La vitesse synchrone
Ω_r	: Vitesse de rotation mécanique
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	: Les tensions des trois phases statoriques
I_{as}, I_{bs}, I_{cs}	: Les courants des trois phases statoriques
I_{ar}, I_{br}, I_{cr}	: Les courants des trois phases rotoriques
$\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$: Les flux des trois phases statorique
$\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$: Les flux des trois phases rotorique
R_a, R_b, R_c	: Résistance statorique des trois phases abc
R_A, R_B, R_C	: Résistance rotorique des trois phases ABC
R_s, R_r	: Résistance statorique et rotorique
$[L_s], [L_r]$: Les matrices des inductances statoriques et rotoriques
l_s, l_r	: Les inductances de fuites des statoriques et rotoriques
M_s, M_r	: Les inductances de fuite mutuelle (stator, rotor)
$[M_{sr}]$: La matrice des inductances mutuelles entre le stator et rotor
θ	: La position angulaire du rotor par rapport au stator
θ_s, θ_r	: Angle électrique statorique, rotorique
ω	: Pulsation du réseau
C_{em}	: Couple électromagnétique
J	: Le moment d'inertie de la machine
f	: Le coefficient de frottement
C_r	: Couple résistant
ω_r, ω_s	: Les pulsations électriques respectivement du rotor et du stator
ω_a	: Vitesse angulaire électrique
$[P(\theta)]$: La matrice de PARK
$[P(\theta)]^{-1}$: La matrice inverse de PARK
T_s, T_r	: La constante de temps statorique et rotorique
L_m	: Inductance mutuelle cyclique
Φ_{dm}, Φ_{qm}	: Les flux d'entrefer dans le référentiel (d, q)
X	: Vecteur d'état
V_{sdq}	: Tension statorique dans le référentiel (d, q)
I_{sdq}, I_{rdq}	: Courant statorique et rotorique dans le référentiel (d, q)
Φ_{sdq}, Φ_{rdq}	: Les flux statorique et rotorique dans le référentiel (d, q)
f_p	: La fréquence de la porteuse
R	: La résistance du réseau

Acronymes et Abreviations

L	: L'inductance du réseau
S	: L'opérateur de Laplace
C	: La capacité du filtre intermédiaire
R_c	: Résistance de la charge résistive
i_{ch}	: Le courant de charge
U_{red}	: La tension redressée
V_{eff}	: La tension efficace
i_{ond}	: Le courant de sortie de l'onduleur
P_{reseau}	: Puissance du réseau
P_{charge}	: Puissance de la charge
$\cos \varphi$: Facteur de puissance
Δi	: La largeur de la bande d'hystérésis
ε_j	: L'écart entre le courant de référence
U_c	: Tension du filtre capacitif intermédiaire
T_i	: Transistor IGBT
D_i	: Diode anti-parallel
M	: L'indice de modulation
$V_{refj(j=1.2.3)}$: Tension de référence
$I_{resj(j=1.2.3)}$: Courant des trois phases du réseau
$V_{resj(j=1.2.3)}$: Tension des trois phases du réseau
$I_{refj(j=1.2.3)}$: courant de référence
I_{eff}	: La valeur efficace du courant appelé aux réseaux
PI	: Régulateur proportionnel-intégral
K_p	: Le gain proportionnel du régulateur PI (Proportionnel - Intégral)
K_i	: Le gain intégral du régulateur PI (Proportionnel Intégral)
ϕ_{rref}	: Le flux rotorique de référence
C_{emref}	: Couple électromagnétique de référence
I_{dsref}, I_{qsref}	: Courant statorique de référence dans le plan (d, q)
ϕ_r	: Le flux total
Ω_n	: Valeur nominale de la vitesse mécanique
ϕ_n	: Valeur nominale du flux (rotorique, statorique, d'entrefer)
$V_{dsref}V_{qsref}$: Tension statorique de référence dans le plan (d, q)

Introduction Générale

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue une forme d'énergie dont on ne peut se passer. La demande en énergie électrique est devenue très importante. Face à cela et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, beaucoup de pays industrialisés ont fait recours aux centrales nucléaires qui n'engendrent pas de pollution atmosphérique, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement utilisant des sources renouvelables comme l'éolienne, le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,... Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important participant pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante. Plusieurs pays se sont tournés vers l'énergie éolienne en construisant de grandes centrales éoliennes fournissant de l'électricité à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles.

Pour le développement des sources de production d'électricité par des systèmes éoliens, différentes machines électriques sont utilisées à savoir les machines asynchrones et les machines synchrones. la Machine Asynchrone en Double Alimentation (MADA) est utilisée comme génératrice dans les systèmes éoliens, considérée comme une solution écologique intéressante pour la génération de l'électricité. La génératrice asynchrone double alimentée (DFIG) est davantage adaptée à cette application parce qu'elle reçoit une vitesse variable sur son arbre due à la vitesse variable du vent et elle peut produire au stator une énergie électrique à tension et fréquence constantes.

L'accessibilité au stator et au rotor de la machine offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert de puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou d'injection d'énergie dans les enroulements de la machine.

Le problème de la commande de cette machine est celui du contrôle du couple (puissance active) et la puissance réactive du cotée réseau. La commande vectorielle de la machine avec orientation du flux est généralement adoptée. Elle consiste à contrôler les deux puissances active et réactive de manière découplée à travers les courants rotoriques et les tensions rotoriques.

Cette commande est basée sur des informations sur le vecteur flux et les puissances qui peuvent être estimés par mesure des courants et des tensions statoriques et rotoriques et la position du rotor. Beaucoup de recherches ont été réalisées sur le diagnostic de défauts des génératrices éoliennes. Il existe un besoin constant pour la réduction des opérations et les coûts de maintenance des éoliennes. Le moyen le plus efficace pour réduire ces coûts serait de surveiller en permanence l'état de ces générateurs.

Le travail proposé s'oriente vers l'analyse des grandeurs de la machine (tensions et courants rotorique et statorique, puissances active et réactive) pour donner un modèle diagnostique de défauts de court-circuit au rotor et au stator de la machine ; Ceci est justifié par la disponibilité des différents capteurs de signaux de courants, tensions et de position du rotor nécessaires pour la commande de la DFIG.

Les défauts de court-circuit entre bobines peuvent apparaître suite à la dégradation des isolants causée par une surintensité ou surtension pendant les commutations du convertisseur induisant ainsi une circulation d'un courant très élevé dans les bobines court-circuitées. Ce type de défaut peut amener aux courts-circuits entre phases ou entre une phase et la terre qui peut être évité par une surveillance permanente de l'état de la génératrice.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre qui donne un survol sur les énergies renouvelables et les systèmes de conversion éoliens de manière générale. En effet, une description des différents composants et structures des systèmes éoliens en citant les avantages et les inconvénients de ce système, suivies par un état de l'art sur la machine asynchrone à double alimentation, la présentation des différents défauts qui décolent dans la MAS.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion. On commencera par la modélisation détaillée de la machine asynchrone à double alimentation. Puis, on a étudié le système : machine asynchrone double alimentation-convertisseur. On se met dans le cas le plus pratique où l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux.

Le troisième chapitre est consacré à la commande vectorielle de la MADA connectée à une chaîne éolienne pour un fonctionnement sain. Une modélisation de la turbine et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible seront faites, l'asservissement de la chaîne éolienne complet (vent, turbine, machine asynchrones à double alimentation et convertisseurs).

Dans le quatrième chapitre est logé sur le diagnostic de MADA en défaut de court-circuit liée à la chaîne. On terminera par une CCL générale.

1. Introduction

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau de la terre de la biomasse, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité, et n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires[1]. L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle, elles ont été exploitées par l'homme depuis l'aube de l'humanité, bois de feu, traction animale, bateau à voile, moulin à vent. Malheureusement, ces énergies furent délaissées au profit d'autres sources d'énergies que l'on pensait à l'époque plus intéressantes. Ce n'est que dernièrement, suite à la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique dû à l'effet de serre, les risques du nucléaire et les limites des ressources (pétrole, gaz charbon et uranium) qu'il y a eu prise de conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement est absolument nécessaire. Les énergies dites renouvelables et propres constituent une alternative aux énergies fossiles sur plusieurs points:

- Elles respectent l'environnement (sont propres) ne dégagent pas de gaz à effet de serre, ni de déchets toxiques ;
 - Elles sont comme leurs noms l'indiquent « inépuisables » ;
 - Elles permettent une production décentralisée adaptée aux besoins locaux ;
- Parmi les énergies renouvelables nous citons : L'éolien, le solaire thermique et photovoltaïque, la biomasse, la géothermie, l'hydraulique.

2. Impact des énergies renouvelables sur l'environnement

2.1. Energies renouvelables, définitions, ressources et exploitation

2.1.1. Energies renouvelables

Les énergies renouvelables (soleil, vent, eau, biomasse) sont des sources d'énergie qui se renouvellent assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle de l'homme. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. On peut dire alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau, et la biomasse génère certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que des énergies fossiles [2]. Pour autant, ces énergies ne couvrent encore que 20% de la consommation mondiale d'électricité en notant que l'hydroélectricité représente 92,5% de l'électricité issue de ER (biomasse 5,5%, éolien 1,5%, géothermie 0,5% et

solaire 0,05%). Ainsi, la capacité totale de production d'électricité issue d'énergies renouvelables (hors grande hydraulique) s'élève à 160 gigawatts (GW), soit 4% de la capacité mondiale du secteur énergétique. Les pays en développement produisent 44% de cette capacité, soit 70 GW,[3].

2.1.2. Energies renouvelables dans le monde

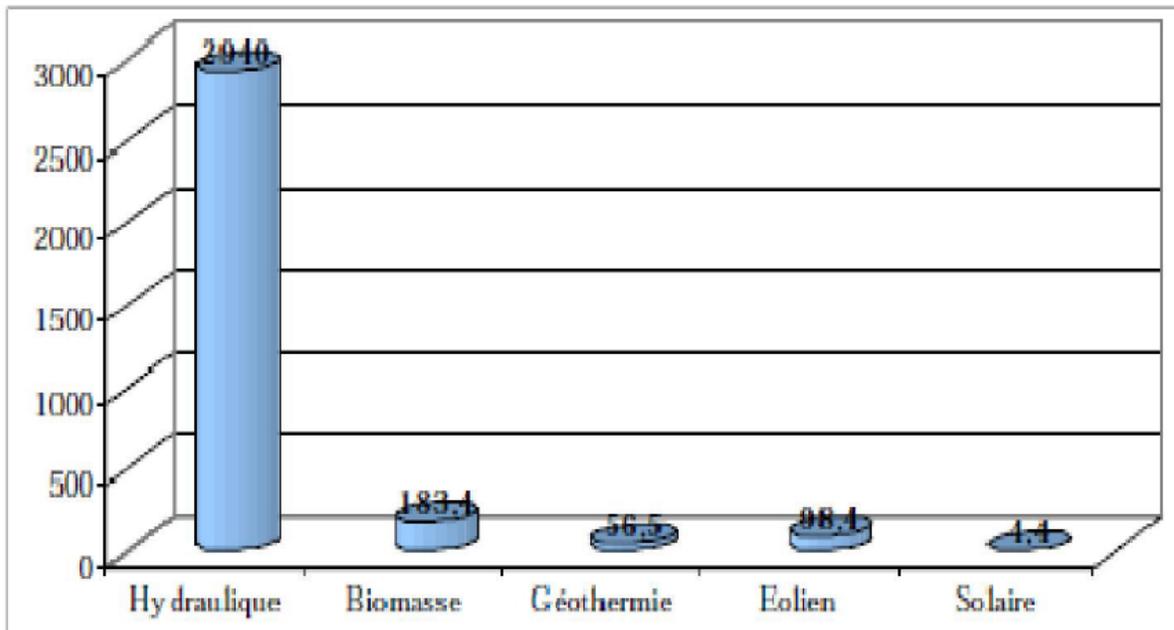


Figure (I.1). La production mondiale d'électricité en 2012

2.1.3. Energie hydraulique

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. Un exemple connu est celui des moulins à eau, placés le long des rivières. Aujourd'hui, bien que de nombreux sites aient été parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation. De nos jours l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages et principalement à la production d'électricité, Le principe en est simple : La force motrice de l'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique (système comparable à une dynamo). Ensuite, l'électricité obtenue peut être soit utilisée directement ou stockée en batteries, soit injectée dans le réseau de distribution. La puissance disponible dépend de deux facteurs la hauteur de la chute d'eau. D'autres énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources [marines](#) :

- Énergie des vagues : elle est produite par le mouvement des vagues et peut être captée par des dispositifs tels que pelâmes, sorte de ver métal articulé ou le Searev. Leur puissance correspond à celle d'une petite éolienne [4].
- Énergie marémotrice : elle est produite par le mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée),
- Énergie hydrolienne : elle est issue de l'utilisation des courants sous-marins,
- Énergie thermique des mers : elle est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans,
- Énergie osmotique : elle a pour origine la diffusion ionique qui a lieu lors de l'arrivée et du mélange d'eau douce dans l'eau salée de la mer [5].

2.1.4. Énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie qui dépend du soleil, bien que cette dernière distante de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires qui permet de récupérer l'énergie du soleil et de produire de l'électricité, sans pièces tournantes et sans bruit et elle n'émet aucun gaz à effet de serre. L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries pour les installations autonomes, soit injectée dans le réseau. Par sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie solaire est une solution technique et économique pour l'électrification des sites isolés. On peut distinguer trois types d'énergie solaire : le solaire photovoltaïque, le solaire passif et le solaire thermique.

2.1.4.1. Énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, décrit par le physicien français Antoine Becquerel (le grand père du découvreur de la radioactivité) en 1839, dont le principe est simple : La lumière du soleil (les photons) est transformée directement en électricité (les électrons) par des cellules photovoltaïques. Ces cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire, qui alimente un réseau de distribution électrique. L'énergie solaire photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où, y compris en centre-ville, permettant d'économiser d'autant les besoins de fourniture par le réseau des bâtiments équipés. Elle est surtout utilisée pour la fourniture d'électricité dans les sites isolés, électrification rurale et pompage de l'eau (50%), télécommunications et signalisation (40%), applications domestiques ((10%),

2.1.4.2. Énergie solaire thermique

A la différence du solaire photovoltaïque, on désigne par énergie solaire thermique la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Le solaire thermique se décline de différentes façons : centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau solaire, cuisinières et sècheurs solaires.

2.1.5. Energie géothermie

Du grec *Gé* (terre) et *thermos* (chaud) l'énergie géothermique est une source d'énergie qui dépend de la chaleur de la terre. Elle provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs naturellement présents dans les roches du sous-sol, dans certaines roches et à certaines profondeurs circule, sous forme de vapeur et d'eaux chaudes. La température des roches augmente en moyenne de 1°C tous les 30m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100m, à la surface de la terre, cette énergie est en moyenne 10000 fois plus faible que l'énergie fournie par le soleil. L'énergie géothermique n'est donc utilisable que dans des zones particulières où elle s'est accumulée.

2.1.6. Energie de la biomasse

L'énergie de la biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire, c'est l'ensemble de la matière organique d'origine biologique, qu'elle soit végétale ou animale par exemple, les plantes et les animaux sont de la biomasse ainsi que les matériaux qu'ils produisent, tels que le bois et les déchets. La biomasse est une énergie renouvelable tant que sa consommation ne dépasse pas l'accroissement biologique. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, ou bien après de nouvelles transformations chimiques biocarburants. La biomasse est une énergie qui peut être polluante; comme le biocarburant et le bois qui donne, quand on le brûle, des gaz à effet de serre.

2.1.7. Energie éolienne

L'énergie du vent ou l'énergie éolienne est le résultat des déplacements de l'air et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Elle peut être utilisée de deux manières : directe et indirecte. Directe : Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin,

Indirect : Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

3. Energie éolienne

3.1. Historique de l'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant J.-C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie.

3.2. Définition De l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences [7]. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produit étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière.

3.3. Principe de fonctionnement

Un système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Cette conversion se fait en deux étapes: [8], [9]

- 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.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [10].

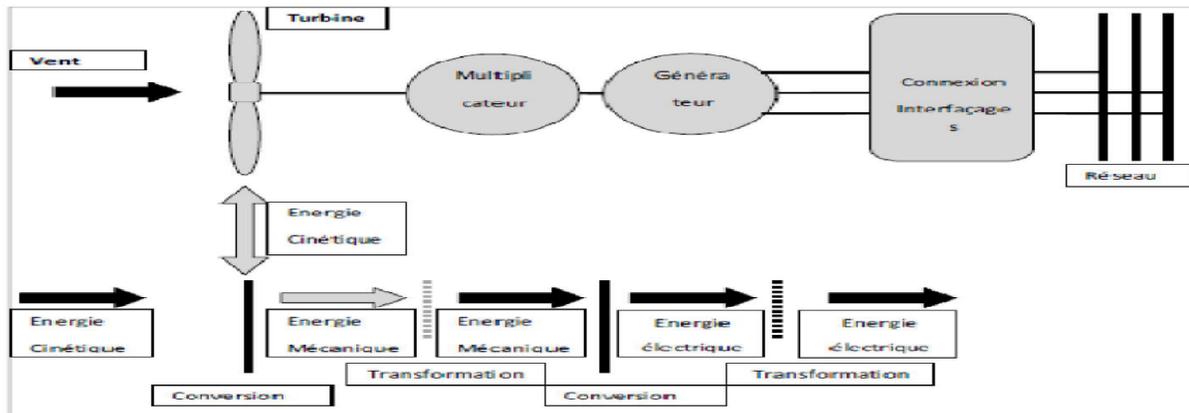


Figure (I.2). principe de conversion d'énergie

3.4. Classification des éoliennes

On peut classer les éoliennes selon plusieurs critères, par rapport à leurs axes ou bien selon leurs gammes de puissances et leurs diamètres. Il existe deux types d'éoliennes modernes: celle à axe horizontal dont le rotor ressemble à une hélice d'avion; et l'éolienne à axe vertical dont la forme s'apparente à celle d'un batteur à œuf à l'envers.

3.4.1. Par rapport à leurs axes

3.4.1.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation: Le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus.

3.4.1.1.a. Les Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical

Les avantages et les inconvénients sont différents d'une éolienne à une autre:

Avantages

- ✓ Les organes de commande et le générateur sont au niveau du sol donc facilement accessibles;
- ✓ L'éolien reçoit le vent de n'importe quelle direction;
- ✓ Conception simple des pales et prix de fabrication réduit [11].

Inconvénients

- ✓ Difficulté de contrôle des pales dans la survitesse;
- ✓ La présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité;
- ✓ La surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [11].

3.4.1.2. Eoliennes à axe horizontal

Dans ces types d'éoliennes, l'arbre est parallèle au sol. Bien qu'elles doivent s'aligner suivant la direction du vent, les éoliennes à axe horizontal sont simples du point de vue mécanique et nécessitent un encombrement au sol relativement faible pour le montage et la fixation de la tour. La plupart des petites et grandes éoliennes installées aujourd'hui sont des éoliennes à axe horizontal. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales [12]. La voilure peut être placée avant la nacelle (face au vent), aussi elle peut être placée derrière la nacelle (sous le vent), comme on le voit sur la Figure (I.3).

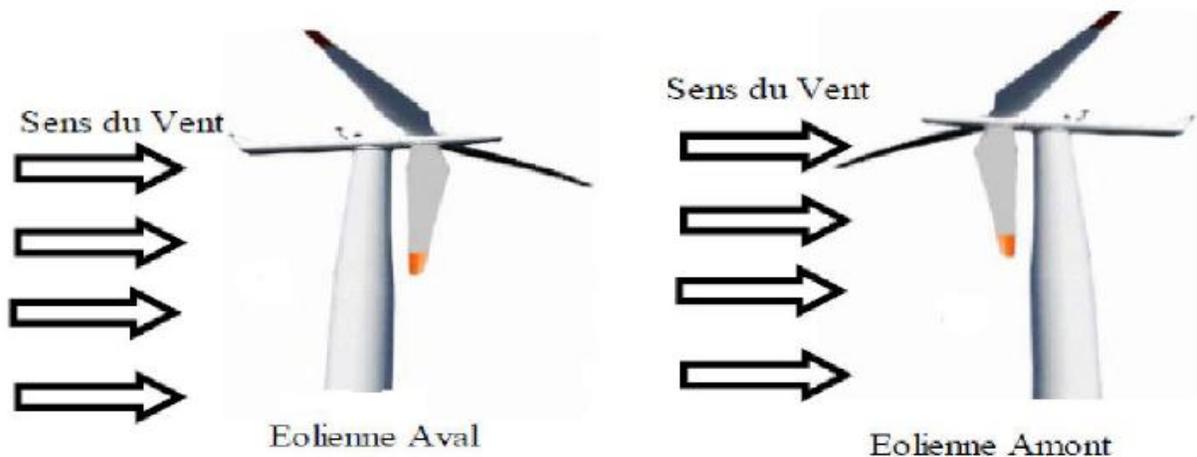


Figure (I.3). Type de montage de la voilure.

3.4.1.2c. Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides (Figure I-4-b) et (Figure I-4-c) ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en

raison de leur efficacité, de leur poids et de leur rendement élevé. Par contre, elles présentent l'inconvénient de démarrer difficilement.

3.4.1.2d. Eoliennes lentes

Les éoliennes lentes (Figure I-4-a) sont munies d'un grand nombre de pales entre (20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse.



Fig(a)

Fig(b)

Fig(c)

Figure (I.4). Les éoliennes à axe horizontal

3.4.1.2e Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal

Avantages

- ✓ Un rendement plus élevé;
- ✓ Un coût moins important;
- ✓ La position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.

Inconvénients

- ✓ Conception plus complexe à exiger en raison du besoin de commande des pales;
- ✓ Le générateur et multiplicateur de vitesse devraient être montés sur une tour, de ce fait l'entretien devient vulnérable [11].

3.4.2. Par rapport à leurs gammes de puissances et leurs diamètres

On peut classer les éoliennes selon leurs gammes de puissances et leurs diamètres Figure (I.5).

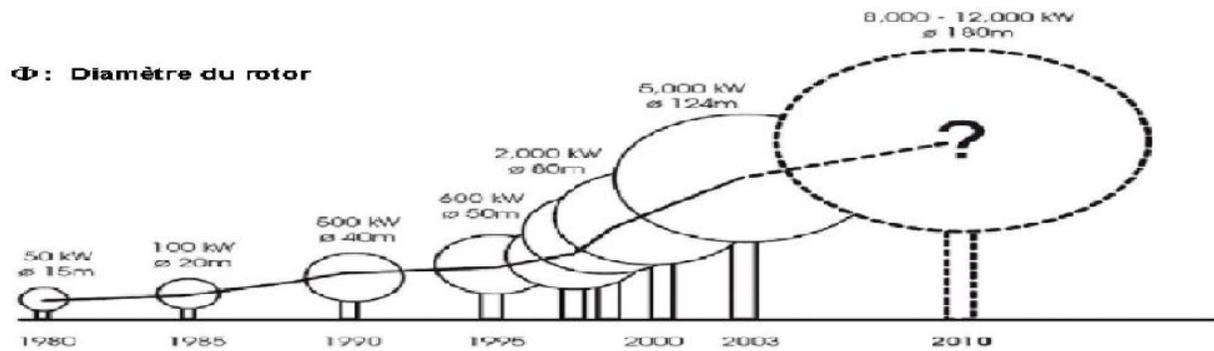


Figure (1.5). Classification des éoliennes selon leurs gammes de puissances et leurs diamètres

Le tableau 1.1 montre quelques caractéristiques suivant la puissance de l'éolienne:

Dimensions des aérogénérateurs selon la puissance	Puissance unitaire en MW 0,5-0,6	Puissance unitaire en MW 1,5	Puissance unitaire en MW 3
Longueur de pale (mètres)	19-22	30-33	50-60
Poids de la pale (tonnes)	1,2	3-5	7-9
Poids de la nacelle (tonnes)	10-25	30-60	>100
Hauteur du pylône (mètres)	40-65	70-100	>100
Poids du pylône (tonnes)	30-40	70-90	>100

Tableau (1.1). Dimensions des aérogénérateurs [13]

3.4.2.1. Régulation de la puissance d'une éolienne

Pour aboutir à optimiser la puissance éolienne dans le but de maximiser l'énergie captée, deux types de régulation sont utilisés, mécanique et électrique.

3.4.2.1a. Régulation mécanique

- ✓ Système Pitch ou à angle de calage variable.
- ✓ Système Stall ou à décrochage aérodynamique.
- ✓ Système Stall actif ou à décrochage aérodynamique actif.

Et un système de calage des pales ou d'orientation face au vent pour les petites éoliennes.

3.4.2.1b. Régulation électrique dans le but de maximiser l'énergie captée

Un dispositif « MPPT », de l'anglais *Maximum Power Point Tracking* correspond à une stratégie de gestion permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs

éoliens à travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent.

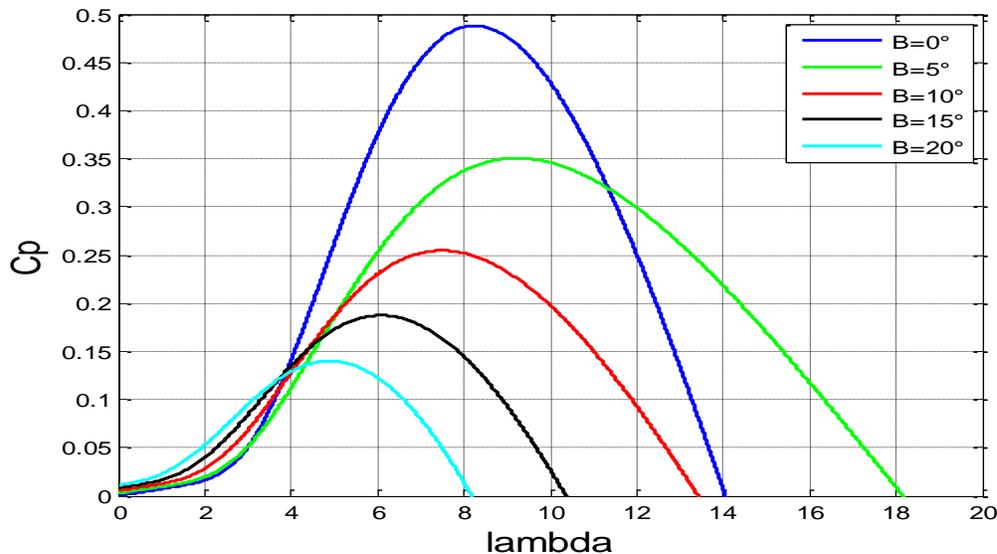


FIGURE (I.6). POINTS DE MPPT D'UNE EOLIENNE TRIPALE AVEC LA VITESSE DE VENT

3.5. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : la tour ou mat, la nacelle et l'ensemble rotor-pales.

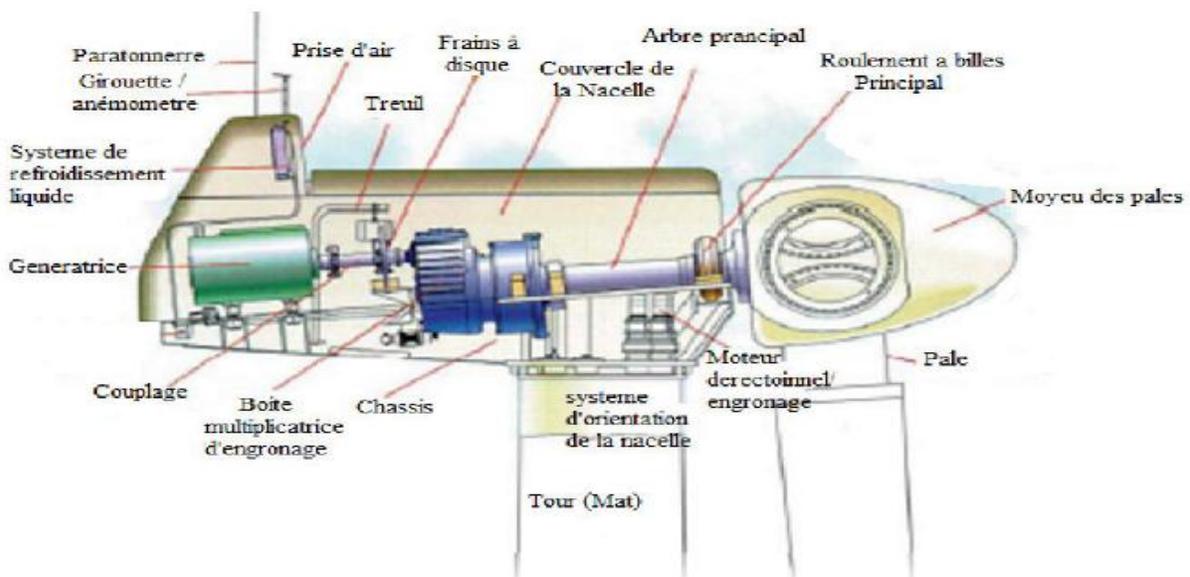


Figure (I.7). Principaux composants d'une éolienne.

3.5.1. La tour (mat)

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol (entre 60 et 100 mètres) [14]. La tour a une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur est disposée les Câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle.



Figure (I.8). Montage d'un mât tubulaire



Figure (I.9). Tour en treillis métalliques

3.5.2. La nacelle

La nacelle est située en haut de la tour, elle comporte toute l'installation permettant la production d'électricité : le multiplicateur, les outils de mesure du vent, le générateur, le système de refroidissement, les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne.

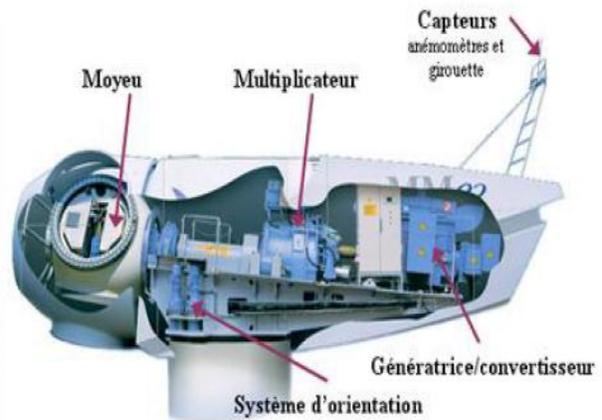


Figure (I.10). La Nacelle.

3.5.3. Les pales

Les pales sont généralement en fibre de verre, Leur diamètre varie en fonction de la puissance désirée (entre 7m et 72m) [14]. Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations.



Figure (I.11). Les Pales

3.5.4. Le rotor

Le rotor est constitué de 1 à 3 pales, il est relié à la nacelle par son moyeu. Son rôle est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.



Figure (I.12). Le rotor

3.5.4a. Les rotors à vitesse fixe

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

3.5.4b. Les rotors à vitesse variable

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

3.5.4c. Intérêts de la vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable est la plus répandue actuellement sur le marché et cela est dû aux avantages qu'elle propose en comparaison à celle à vitesse fixe:

- ✓ L'éolienne à vitesse variable augmente la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance est converti.
- ✓ Elle nécessite un système d'orientation des pales simplifié qui n'intervient que lors de la limitation de la vitesse de la turbine éolienne et de la puissance générée lors des vitesses de vent élevées. Par conséquent pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation est fixe.
- ✓ Elle réduit les efforts mécaniques de par le fait lors de variations du vent, la vitesse de la turbine est adaptée.
- ✓ Elle réduit le bruit lors du fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente.
- ✓ Elle permet surtout une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.

3.5.5. Frein

Il sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer des réparations.

3.5.6. La génératrice

La génératrice est un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle peut être synchrone ou asynchrone.



Figure (I.13). Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes.

3.5.7. Le multiplicateur

Le multiplicateur relie l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide.



Figure (I.14). Le multiplicateur

3.5.8. l'arbre de transmission

Il est composé de deux arbres :

- ✓ L'arbre primaire: cet arbre transmet l'effort fourni par le rotor au multiplicateur. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre (20-40tr/mn) [14].
- ✓ L'arbre secondaire: il entraîne la génératrice à des vitesses élevées (environ 2000tr/mn) et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence (Figure 15). [15].

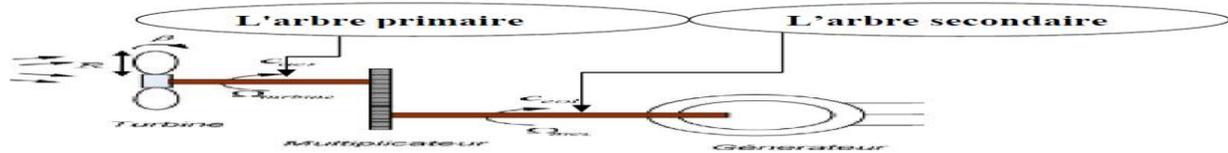


Figure (I.15). L'arbre de transmission.

3.5.9. Le système de refroidissement

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur qui encaisse les efforts mécaniques d'un arbre à l'autre.

3.5.10. Les outils de mesure du vent

Nous avons deux types : une girouette (Figure I.16) pour évaluer la direction du vent et un anémomètre (Figure I.17) pour en mesurer la vitesse.

3.5.10a. Anémomètre

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s pour assurer la protection de l'éolienne[14].



Figure (I.16). Girouette Figure(I.17). Anémomètre

3.5.11. Système d'orientation de la nacelle

Les grandes éoliennes utilisent des moteurs électriques ou hydrauliques pour faire pivoter la nacelle face au vent.



Figure (I.18). Système d'orientation de la nacelle

3.5.12. Système de contrôle (commande)

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de surchauffe du multiplicateur ou de génératrice le système arrête automatiquement l'éolienne, et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique [16].



Figure (I.19). Système de contrôle (commande).

3.5.13. La fondation en béton

Une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grand vent et/ou dans des conditions de givrage.



Figure (I.20). La fondation en béton

3.6. Protection contre la corrosion

Les différentes parties de l'éolienne sont protégées contre la corrosion par un revêtement spécial à plusieurs couches. Les éléments particulièrement exposés aux intempéries, comme par exemple le moyeu du rotor, sont galvanisés.

3.7. Avantage et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà. L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [17].

Inconvénients

Même s'il s'en sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

- ✓ L'impact visuel a été nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- ✓ L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- ✓ La qualité de la puissance électrique: la source d'énergie éolienne étant stochastique, la qualité de la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien sur les meilleurs sites, c'est-à-dire là où il y a le plus de vent, concurrence la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- ✓ L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

- ✓ Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles
- ✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de la vie
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermique et des centrales nucléaires.

3.8. L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains

- ✓ C'est une source d'énergie locale qui répond au besoin locaux en énergie ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre l'énergie renouvelable.
- ✓ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- ✓ Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

4. Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques [18]. On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs.

4.1. Types de machines électriques

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

4.1.1. Générateur synchrone

C'est le type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de productions d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (Figure I.21), sa vitesse de rotation fixe est proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau.

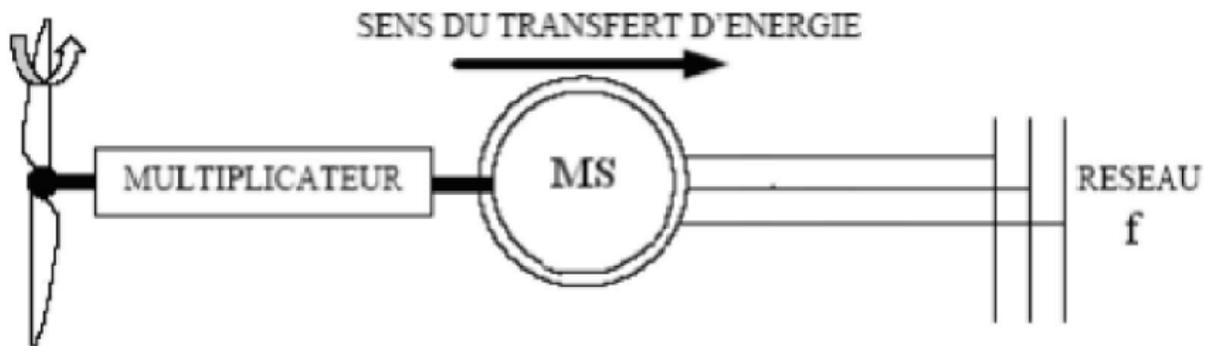


Figure (I.21). Machine synchrone connectée directement au réseau

4.1.2. Générateur asynchrone

La connexion au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Il existe deux catégories de machine asynchrone : les machines asynchrones à cage d'écurieul et les machines asynchrones à rotor bobiné.

4.1.2.1. Machine asynchrone à cage d'écurieul

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice à cage d'écurieul qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. Le dispositif, le plus simple et le plus couramment utilisé, consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau

(Figure I.22). La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts de glissements) permet de limiter la maintenance de la machine. Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes.

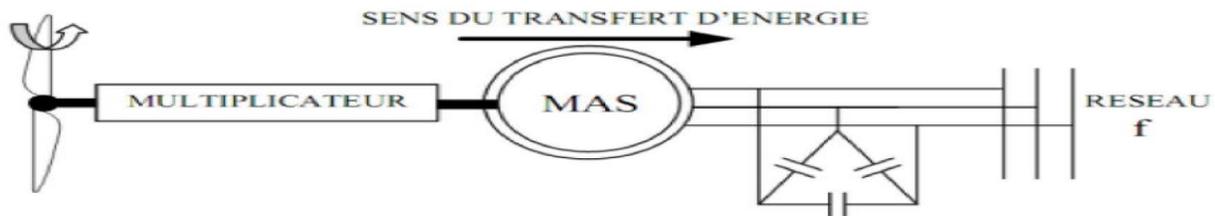


Figure (I.22). Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

4.1.2.2. Machine asynchrone à double alimentation

À la place du rotor à cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement. Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

5.1. Description de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone double alimentation (MADA) en anglo-saxon "doubly-fed induction machine (DFIM)" est, comme son nom l'indique, une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements [19]. Ce type de machine nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'entraînement et de génération à vitesse variable, dont le glissement peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technoéconomique de

construction[20]. La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties. Le stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques (Figure 1.24), et le rotor (Figure 1.25) tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent des balais. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur de puissance[20].

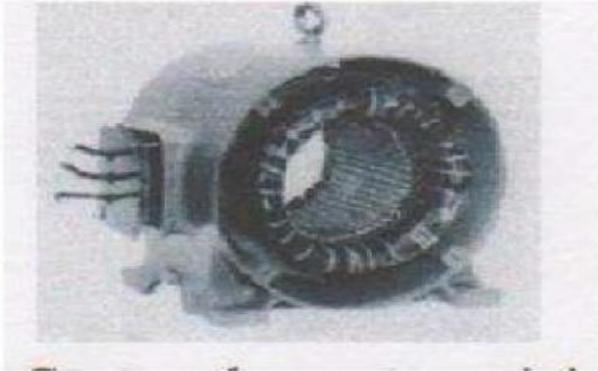


Figure (1.24). stator à induction



Figure (1.25). Rotor bobiné

5.2. Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements[21]. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure 1.26).

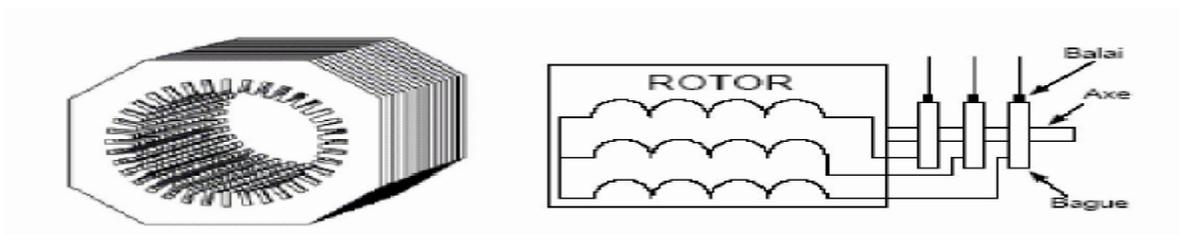


Figure (I.26). Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage), le rendement de la machine est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hypo synchrone[19].

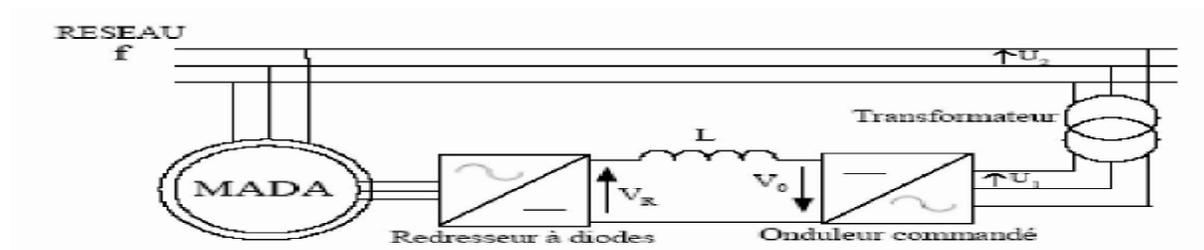


Figure (I.27). Cascade hypo synchrone

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

5.2.1. Doubles alimentations par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (Figure I.28)

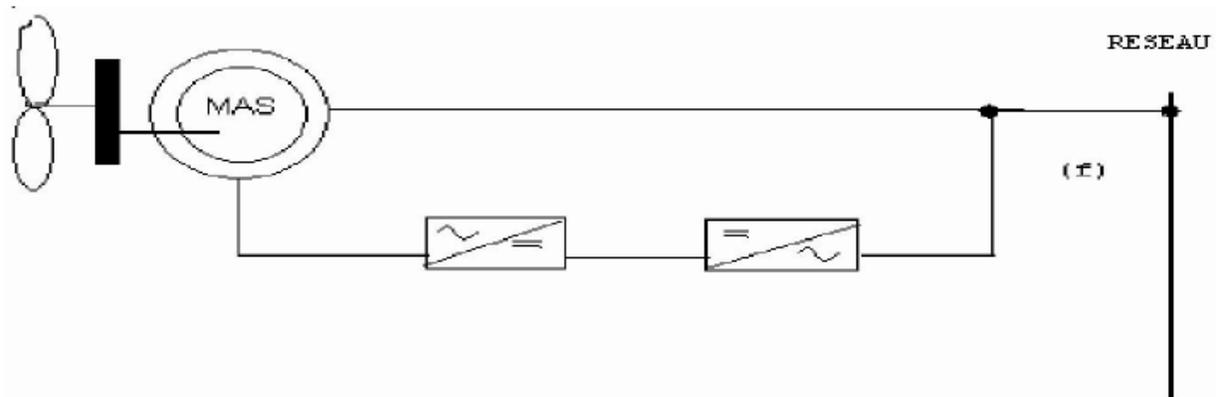


Figure (I.28). Machine asynchrone à double bobinage statorique.

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage. L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une partie du courant nominal de la génératrice y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit. Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine ; le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu. Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers.

5.2.2. Double alimentation par le stator et le rotor

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (Figure I.29). Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance p est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournit, $(1 - g)p$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gp sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $g.f$. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique,

auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)p$; les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (figure I.30). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

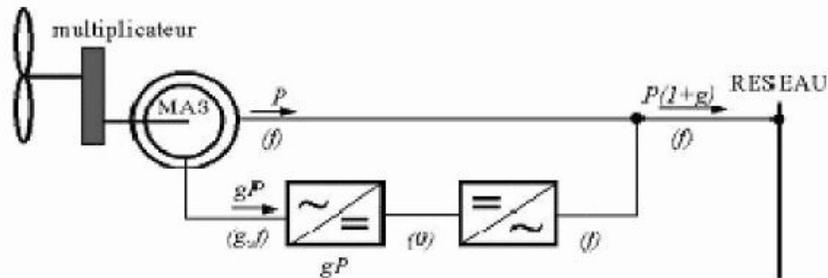


Figure (I.29). Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

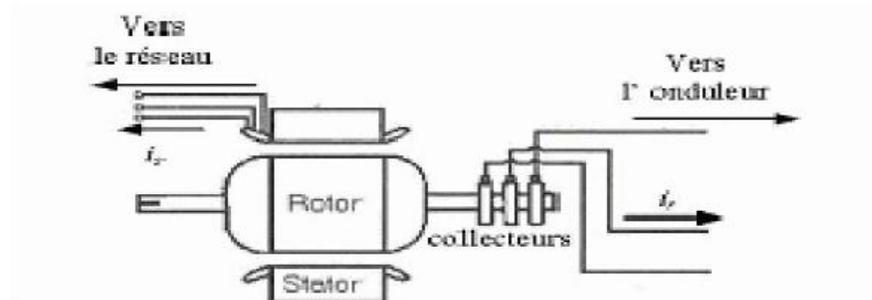


Figure (I.30). Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices

5.3. Classification des machines asynchrone à double alimentation

La classification de la machine à rotor bobiné est obtenue à partir d'une recherche bibliographique qui a été développée dans le domaine littérature du domaine des machines à double alimentation [19] [20].

Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives et les plus développées dans la littérature sont classifiées par un organigramme donné précédemment. Le schéma de principe et la description de chaque variante seront détaillées ci-dessous.

5.3.1 Machine asynchrone à double alimentation

La Figure (I.31) montre que la machine à double alimentation à rotor bobiné est une machine asynchrone occupée par un système balais-bague qui alimente l'enroulement du rotor. La Figure (I.32) illustre le schéma de principe de ce type de machine, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, alors que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de cette machine devient une grandeur contrôlable. Il faut noter que le convertisseur bidirectionnel indiqué dans la figure peut être un convertisseur indirect (AC/DC/AC) composé d'un redresseur et d'un onduleur ou bien un convertisseur direct (AC/AC) cyclo-convertisseur ou convertisseur matriciel [22][23].

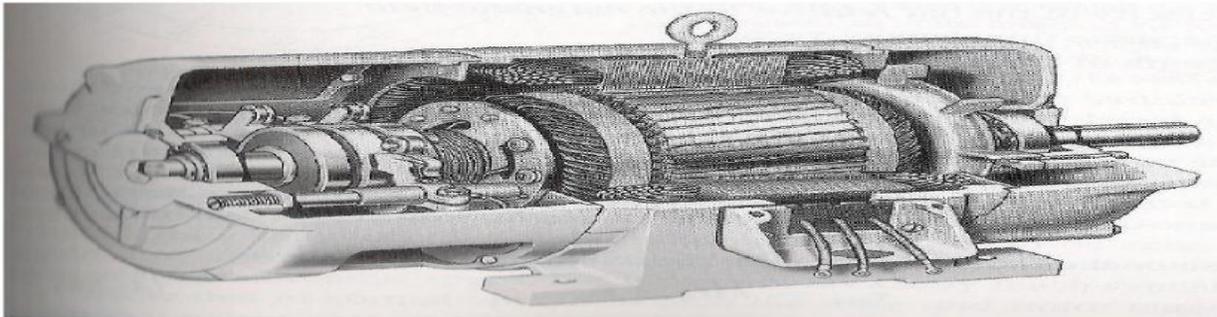


Figure (I.31). Coupe d'une machine asynchrone à rotor bobiné (standard)

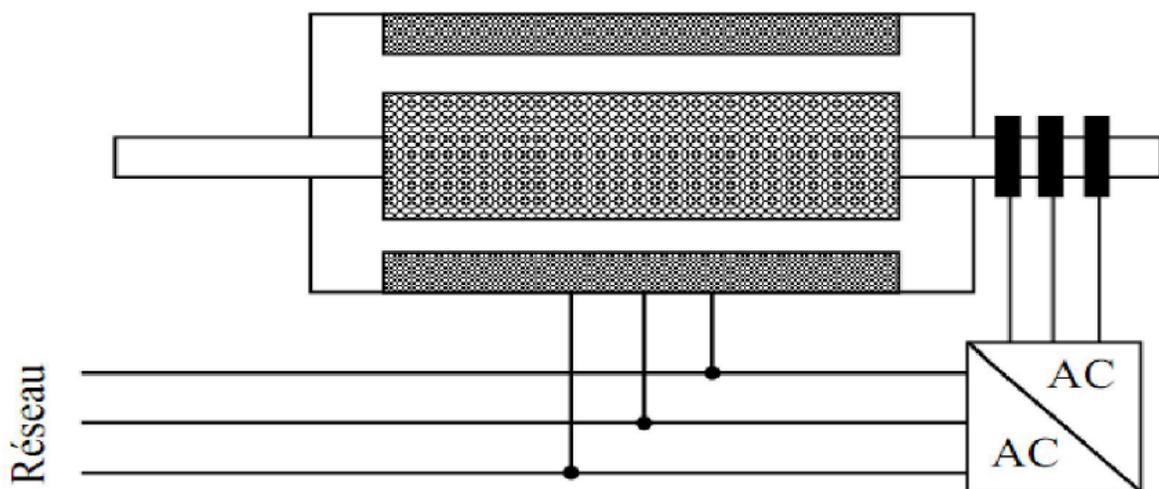


Figure (I.32). Schéma de principe de la machine à double alimentation à rotor bobiné (standard)

5.3.2. MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION EN CASCADE ASYNCHRONE

La machine à double alimentation en cascade asynchrone consiste en deux machines avec des rotors bobinés connectés mécaniquement et électriquement, comme l'indique la Figure (I.33). Le stator de l'un des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence (AC/AC). Il est également possible de piloter l'ensemble du système à travers le stator alimenté par un convertisseur.

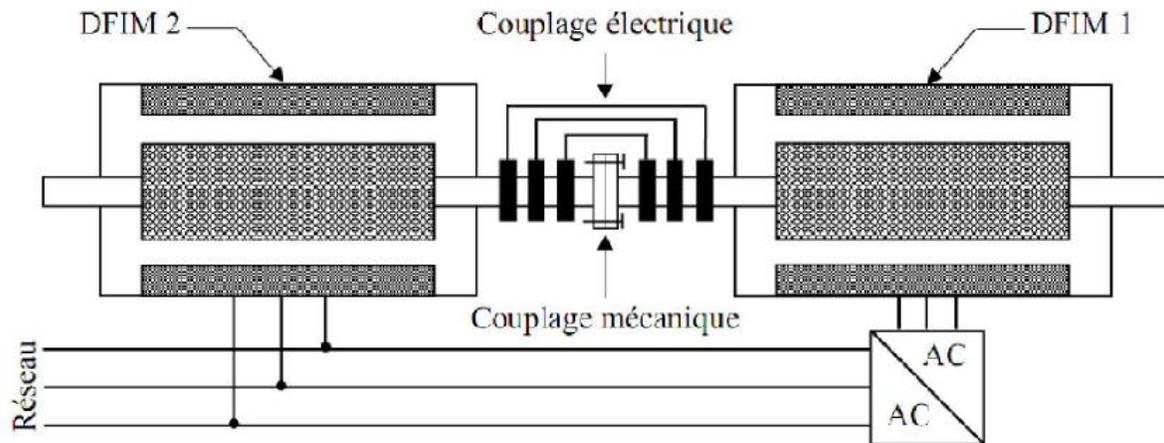


Figure (I.33). Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone

Ce type de machine offre la possibilité d'avoir une commande découplée des puissances active et réactive similaire à celle de la machine à double alimentation standard. [24][25]. Pratiquement, il est aussi possible de combiner deux machines asynchrones à rotor bobiné dans une seule machine avec un comportement identique à celui de la machine à double alimentation en cascade asynchrone, tel que les deux enroulements des stators sont logés dans une seule armature et le rotor soit à cage d'écureuil, comme dans le cas de la machine double alimentation sans balais.

5.3.3. Machine asynchrone à double alimentation sans balais

C'est une machine asynchrone avec deux enroulements ayant des nombres de paires de pôles différents logés dans la même armature du stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre est alimenté au moyen d'un convertisseur de puissance (AC/AC) Figure (I.34). Le rotor de cette machine possède un nombre de paires de pôles égale à la somme des deux nombre de paires de pôles des deux enroulements statoriques.

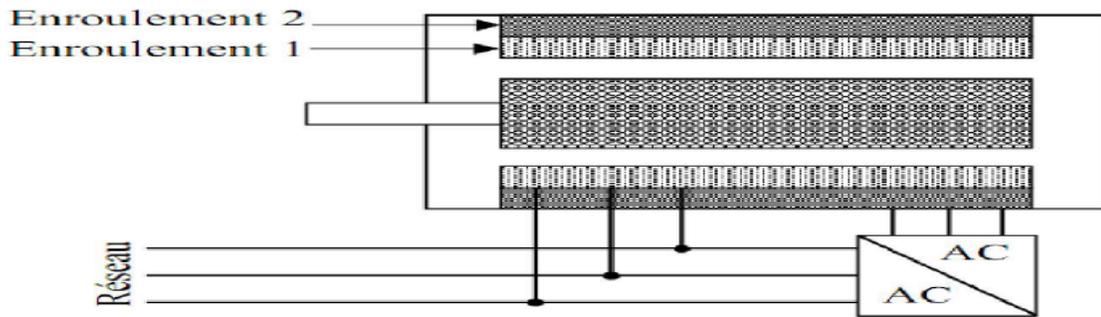


Figure (I.34). Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais

Parmi les types les plus connus de machine à double alimentation sans balais, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable qui consiste en un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans balais et un rotor basé sur le principe de la réluctance [24][25].

5.4. Comparaison entre les différentes variantes de Machine asynchrone à double alimentation

variantes de la machine à double alimentation les plus attractives dans la littérature. Dans ce cas, les critères de comparaison sont fondés sur la complexité de la construction de la machine, la puissance traitée par le convertisseur associé à la machine et la stratégie de contrôle [19] [24]. On peut conclure que, toutes les machines à double alimentation citées dans le tableau (I.2) doivent fonctionner pour une vitesse autour de celle de synchronisme et nécessitent pour leur commande un convertisseur bidirectionnel de puissance. Dans cette condition, plus la gamme opérationnelle est étroite (que doit être autour de la vitesse de synchronisme) plus la puissance traitée par le convertisseur est réduite. De vue stratégie de commande il n'y a pas de grande différence entre ces variantes.

Type de la machine à double alimentation	Construction de machine	Convertisseur de puissance	Méthode de commande
Machine à rotor bobiné	Etablie	Dépend de la vitesse opérationnelle	Orientation du flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive
Machine en cascade asynchrone	Difficile	Comme la machine à rotor bobiné	Orientation du flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive
Machine sans balais	Spécial, prototypes disponibles et toujours en recherche	Comme la machine à rotor bobiné	Orientation du flux rotorique et orientation simplifiée du flux rotorique comme la machine à rotor bobiné
Machine à réluctance variable	Spécial, prototypes disponibles et toujours en recherche	Comme la machine à rotor bobiné	Comme la machine à rotor bobiné

Tableau(I.2). Classification et comparaison des différentes variantes de la machine à double alimentation

Alimentation sera finalement réussie. Cependant, nous pouvons affirmer d'après la Littérature que la machine double alimentation à rotor bobiné standard et la machine à réluctance variable restent plus attractives par beaucoup de chercheurs. D'autre par, un intérêt de plus en plus croissant est accordé actuellement à la machine asynchrone en cascade et à la machine sans balais, vue que ces dernière présentent un rendement élevé du au courant réduit dans leurs rotors[19]. Jusqu'à présent et grâce à l'évolution récente dans les domaines de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, la machine à double alimentation standard reste la machine la plus attractive de l'avis de nombreux chercheurs, vu qu'elle est bien adaptée dans plusieurs domaines d'application. En effet, elle présente une construction établie et simple par rapport aux autres types. Sa commande se fait sur la base d'un convertisseur de puissance disponible (AC/AC); de même elle possède une commande par orientation de flux statorique permettant d'obtenir un contrôle découplé des puissances active et réactive.

5.5. Mode de fonctionnement de la MADA

5.5.1. Fonctionnement à vitesse variable

La Figure (I.35) donne la configuration de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure de Scherbius PWM), P_{RES} est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, la puissance transitant par le stator, la puissance transitant par le rotor, et P_{MEC} la puissance mécanique [19]. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [26] [20].

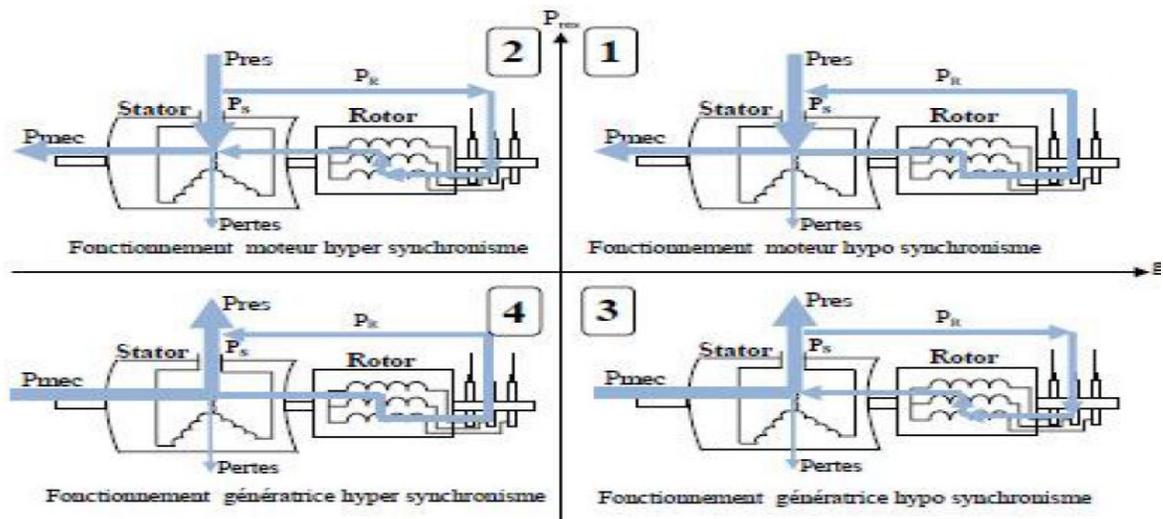


Figure (1.35). Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hypo synchrone. En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique. En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournir à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à gP_{mec} est transmise par l'intermédiaire du rotor. Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au-delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du Convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une Puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale ; le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est-à-dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine [27]. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbation que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

Remarque

Dans la machine asynchrone à cage classique, un signe négatif du glissement traduit un fonctionnement générateur de la machine, ce qui peut porter confusion par rapport à la

compréhension du principe de fonctionnement de la MADA. Dans la machine asynchrone doublement alimentée, le signe de glissement traduit un fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme et non pas le mode de fonctionnement de la machine (Moteur ou générateur). Il existe plusieurs types de génératrices utilisées dans le fonctionnement à vitesse variable représentés par le tableau (I.3) suivant [28] :

Génératrices utilisées	Caractéristiques
Machine asynchrone en autonome	Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine
Machine asynchrone à cage débitant sur un réseau	Obligation de fonctionner au voisinage du synchronisme.
Machine à double alimentation ou MADA	Autorise le fonctionnement à vitesse variable
Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	Bon rendement, faibles puissances, adaptée aux faibles vitesses mais prix élevé.
Machine à réluctance variable (MRV)	Permettant de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse.

Tableau (I.3). tableau des différentes génératrices utilisées

5.5.2. Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple,
- plus grande fiabilité,
- peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne,
- pas besoin de système électrique de commande,
- moins cher.

5.6. Domaine d'application de la Machine asynchrone à double alimentation

5.6.1. Dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable

Les systèmes d'entraînement électriques transforment l'énergie électrique en énergie mécanique pour des applications utiles. Dans ce cas, le moteur électrique est le composant noyau d'un tel système d'entraînement électrique. Généralement, il y a trois critères essentiels pour la sélection des moteurs électriques pour les applications dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable :

- Rendement énergétique.
- Exigence de la commande en vitesse ou en position.
- Amélioration de la réponse en régime transitoire.

Le moteur, le convertisseur statique et le système de commande sont les trois éléments constructifs dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable (Figure I.36). Dans ce cas, le moteur doit assurer la rotation dans un sens ou l'autre avec la possibilité de freinage dans les deux sens. Le convertisseur de puissance a pour objectif de contrôler l'écoulement de puissance entre la source d'alimentation et le moteur. Son choix est affecté par le niveau de puissance, les quadrants opérationnels du moteur et la qualité de puissance. L'algorithme de commande est utilisé pour générer les signaux de commande pour le convertisseur de puissance, afin de contrôler le couple, la vitesse ou la position [20].

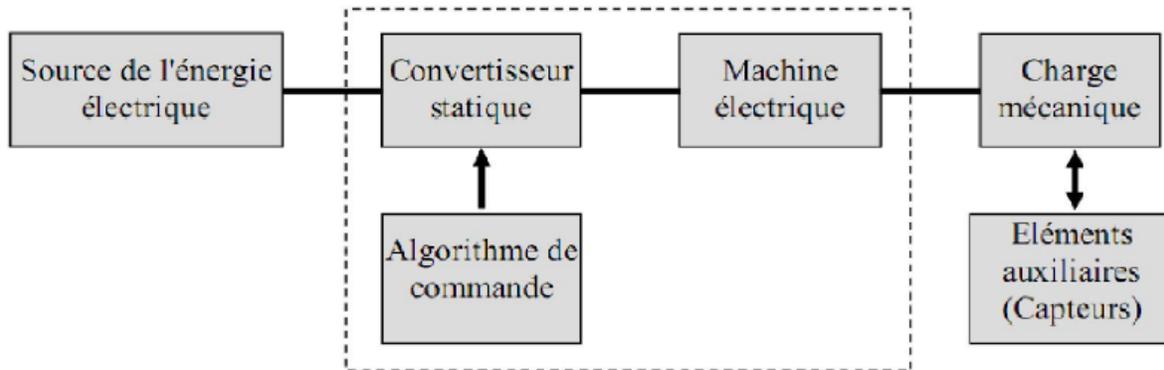


Figure (I.36). Architecture d'un système d'entraînement à vitesse variable

Grâce au développement rapide du moteur, du convertisseur et de la commande et leur intégration, le domaine d'entraînement à vitesse variable a connu ces dernières années un essor considérable notamment ce qui concerne l'amélioration du rendement énergétique et les hautes performances dynamiques offertes par celui-ci. Par conséquent, le choix d'un tel système d'entraînement à vitesse variable s'appuie généralement sur les critères suivants :

- ✓ Le coût.
- ✓ La fiabilité.
- ✓ Les performances (rapidité, précision et robustesse).
- ✓ Le rendement énergétique.
- ✓ La taille et le poids.

Le moteur asynchrone à rotor bobiné offre des nombreux avantages par rapport au moteur asynchrone et synchrone surtout en ce qui concerne la gamme de la vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement. De plus, il présente un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste tel que le laminoir, la traction ferroviaire, la propulsion des navires, le véhicule électrique, le ventilateur et la pompe d'eau.

5.6.2. Dans les systèmes de génération éolienne à vitesse variable

Une éolienne à vitesse variable a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en Energie électrique avec un rendement optimisé. Par conséquent, les différents éléments du système éolien sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. La Figure (I.6), présente la caractéristique de la puissance maximale captée en fonction de la vitesse de la turbine pour des différentes vitesses du vent, dans le cas où l'orientation des pales est parfaitement réalisée. Dans les systèmes éoliens de production de l'énergie électrique à vitesse variable, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant la machine asynchrone à rotor bobiné. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme dont l'objectif d'avoir un convertisseur de puissance dimensionné à une fraction de 20-30 % de toute la puissance de système, et ce qui permet de minimiser les pertes et réduire le coût de celui-ci, [29][25].

5.6.2.1. Application de la MADA dans les systèmes éoliens

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas (\pm) 30% en de ça ou au de la de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale [28].

5.6.2.2. Type de machine électrique utilisée

Les éoliennes actuellement installées peuvent être classées selon deux catégories : les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées, elles contenaient pour la plus part un générateur asynchrone à cage d'écureuil. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paire de pôles de la génératrice Figure (I.37). En effet c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, Une fiabilité et un faible coût, ce qui permet une installation rapide de certaines de KW. Cependant, pour des puissances supérieures au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir. En effet ces dernières présentent deux structures :

La première configuration Figure (I.37), basée sur une machine asynchrone à cage pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable par des convertisseurs statiques. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système. La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs. Il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille de plus les performances des

composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tel que les transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance. La deuxième configuration Figure (I.37) basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance situés au circuit rotorique. La plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator, et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important.

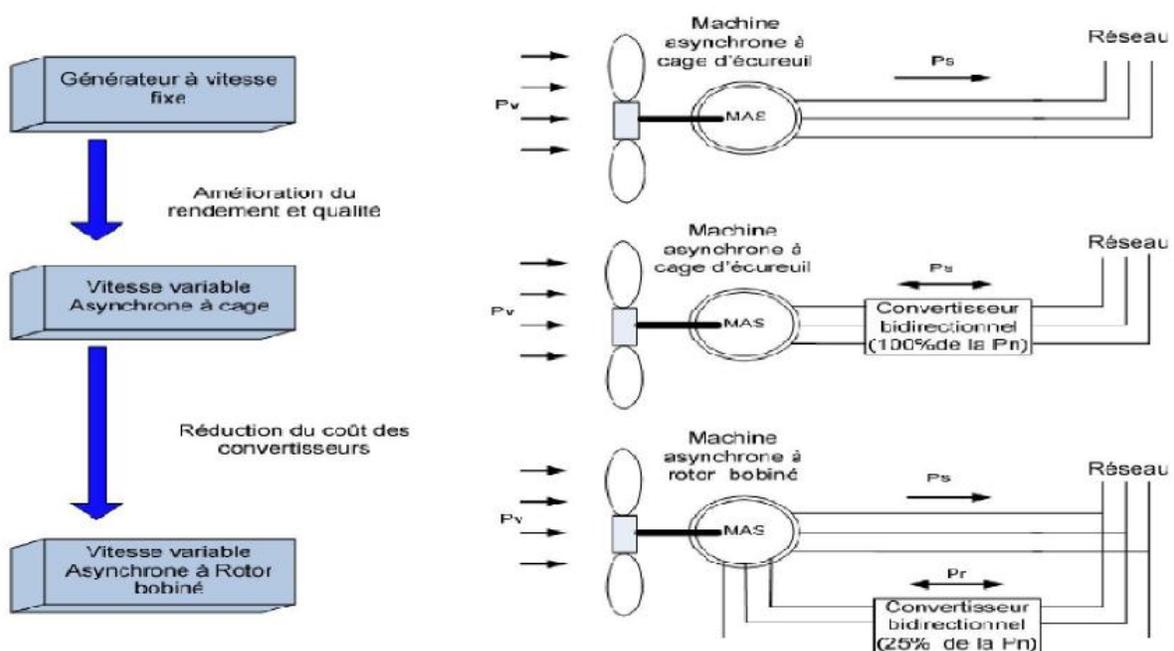


Figure (I.37). Evolution de la configuration électrique

Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des générateurs Asynchrones doublement alimentés (à rotor bobiné). Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentations ainsi que plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables et sont présentes [28].

5.7. Intérêt de la MADA

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance

possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [24] [2].

5.8. Avantages et inconvénients de la MADA

Avantages

- ✓ La possibilité de fonctionner à couple constant au de là la vitesse nominale.
- ✓ La mesure des courants au stator et rotor, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- ✓ Le partage des fréquences entre le stator et le rotor: en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement[32].

Inconvénients

- ✓ Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- ✓ Machine plus volumineuse que celle à cage, à causes des balais [32]. Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que les autres types de MADA. Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la fiabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toute fois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements [32].

6. Généralités des défauts des Machines Asynchrones

6.1. Introduction

Les machines électriques sont très utilisées dans l'industrie et surtout la machine asynchrone qui, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. La quasi-absence de son entretien a permis d'étendre son domaine d'utilisation à tous les domaines industriels et en particulier dans les domaines de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les éoliennes. Malgré sa robustesse, cette machine subit, au cours de sa durée de vie, des sollicitations qui la rendent potentiellement défaillante. Cette défaillance peut avoir de graves conséquences sur le processus industriel en général [1a]. Dans les chaînes industrielles, le maillon faible est la machine électrique, car sa panne paralyse immédiatement la production et entraîne une perte sèche très importante. Une maintenance dite « prédictive », doit être donc assurée afin de prévenir à temps les défauts susceptibles de se produire dans les machines (phase statorique mise en court-circuit, rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit, excentricités, défauts de roulements,...). Les études actuelles portent sur les petits défauts (par exemple : un court-circuit entre spires), ceci afin de prévenir les grands. Généralement, le diagnostic des défauts est fait à partir du spectre des grandeurs électriques. Les fréquences de défaut dépendent non seulement du défaut, mais aussi du glissement et du choix de l'alimentation.

6.2. Cause des défauts

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes :

- ❖ Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts: surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problèmes mécaniques, rupture de fixations, problèmes d'isolation, survoltage d'alimentation....
- ❖ environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement....
- ❖ Les vices de fabrication et les erreurs humaines: défauts de fabrication, défauts des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine....

Les amplificateurs des défauts: surcharge fréquente, vibrations mécaniques,

6.3. Présentation des défauts

La machine asynchrone comporte une partie fixe appelée stator qui est constituée d'un enroulement triphasé placé dans les encoches du circuit magnétique et d'une partie mobile appelée rotor, qui est constituée soit d'une cage ou d'un enroulement court-circuité placé dans des encoches. Dans ce qui suit nous allons présenter les différents défauts pouvant affecter la machine asynchrone. On distingue deux types de défauts dans la machine asynchrone:

- ❖ **Défauts affectant le stator.**

- ❖ **Défauts affectant le rotor.**

6.3.1. Défauts affectant le stator

Ces défauts sont généralement liés à la dégradation de l'isolation électrique. Ils sont généralement connus comme des défauts de court-circuit entre une ou plusieurs phases et/ou la terre. Rappelons que les défauts statoriques peuvent être : des court-circuits entre spires des enroulements de la même phase, ou de phases différentes, des court-circuits phase-terre, ou une ouverture de phase, provoquant tous une dissymétrie au niveau du stator. (Fig. I.37).

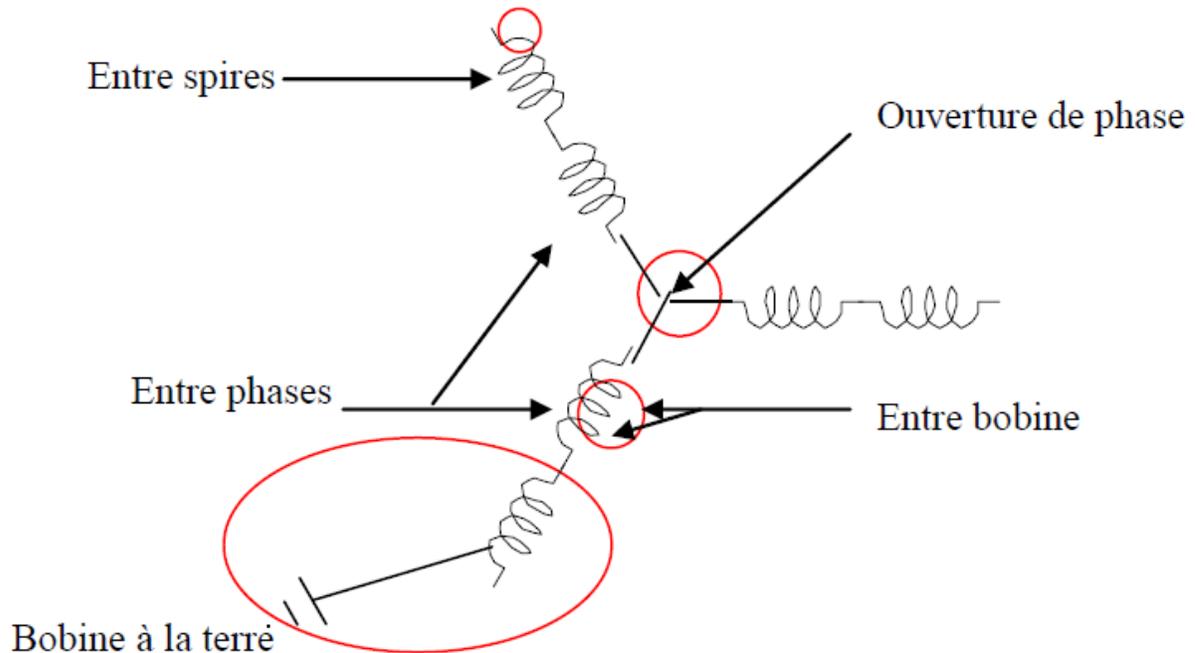


Fig. (I.37) : Représentation des différents défauts statoriques possibles

A terme, ces défauts destructifs pour les couches de vernis protecteur des enroulements, conduisent à une machine déséquilibrée et à une modification de sa classe d'isolation. Cette détérioration au niveau de l'isolation peut exister pour diverses raisons :

- ❖ Une augmentation de la température des enroulements ou de l'armature statorique.
- ❖ Déconnection des attaches des enroulements.
- ❖ contamination due à l'humidité et à la saleté.
- ❖ court-circuits ou contraintes de démarrage.
- ❖ décharges électriques.

6.3.2. Défauts affectant le rotor

On définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

6.3.2.1. Rotor à cage d'écureuil

Les défauts affectant ce type peuvent être :

6.3.2.1.1. Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique

La détection de ce type de défaillances est souvent difficile vu le fait que la machine continue de fonctionner en présence de ces défaillances. Ces derniers ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et modifient la valeur du couple électromagnétique, qui va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [10a].

6.3.2.1.2. Défaut de roulements

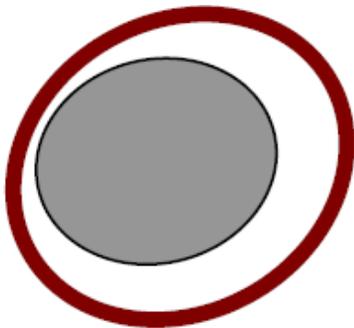
Ce type de défaut ainsi que sa détection est très peu mentionné dans la littérature des électrotechniciens. Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et une autre extérieure, entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants. En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par de petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations détectables et augmente le niveau du bruit.

❖ L'excentricité statique

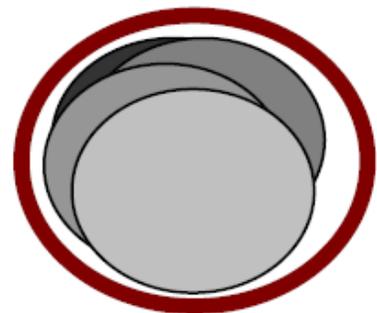
Dans ce type d'excentricité, la position de l'épaisseur minimale de l'entrefer est fixe dans l'espace. Elle peut être causée par la forme ovale de la partie intérieure du stator ou encore par le mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction. Si cependant l'assemblage entre le rotor et l'arbre est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas.

❖ L'excentricité dynamique

Pour ce qui est de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation, et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Les causes de ce type d'excentricité sont, la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le défaut d'alignement du roulement, la résonance mécanique à la vitesse critique [11a].



Excentricité statique



Excentricité dynamique

Plusieurs positions du rotor au cours de sa rotation

Fig. (I.38): Représentation de l'excentricité statique et dynamique

6.3.2.2 Rotor bobiné

6.3.2.2.1 Défaut de court-circuits

Les spires court-circuitées dans les générateurs de puissance à rotor bobiné affectent le fonctionnement de la machine, provoquent des niveaux élevés de vibration ; et donc la détection précoce est importante [12a]. Sachant que le bobinage triphasé du rotor est similaire à celui du stator ; donc les défauts qui peuvent affecter le bobinage rotorique est de même type que les défauts statoriques tel que des court-circuits entre spires des enroulements de la même phase, ou de phases différentes, des court-circuits phase-terre, ou une ouverture de phase, qui provoquent une dissymétrie au niveau du rotor.

6.3.2.2.2 Défaut de contact balai - bague

Le défaut de contact balai-bague introduit une différence (déséquilibre) de résistances entre les trois phases rotoriques. Ce qui influe sur les performances du système parce que la commande est sensible à la constante de temps rotorique et augmente les pertes.

6.3.3. Méthodes de diagnostic utilisées pour détecter les défauts de la machine

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à ce sujet, ainsi, de nombreux travaux ont pu voir le jour. Seulement les méthodes les plus couramment utilisées pour le diagnostic des défauts mécaniques et électriques seront présentées par la suite. On y trouve donc [1a] :

6.3.3.1 Analyse des courants

Les méthodes basées sur l'examen du courant statorique sont désignées sous le nom de "l'analyse des signatures des courants du moteur" (MCSA). Cette méthode consiste à détecter les défauts par l'étude de certains composants fréquentiels. Elle est très utilisée, car elle est simple, peu coûteuse et la partie expérimentale est facile à exécuter, ce qui la rend très populaire, notamment dans la détection des défauts statoriques, et plus particulièrement des défauts de court-circuit entre spires [13a][14a]. Une étude sur les fréquences caractéristiques des principaux défauts est présentée dans ce qui suit :

6.3.3.1.1. Défaut de barres rotoriques

Laboratoire en raison à sa simplicité de réalisation mais non nécessairement le plus probable. Ce défaut induit des modifications dans les courants du stator et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal . En effet, lors de l'apparition d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences $f_b = (1 \pm (2.k.g))f_s$, De plus, les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défailantes [16a][17a].

Le courant statorique avait un spectre enrichi par la création d'un court-circuit au stator les fréquences additionnelles sont donné par [12a] : Le courant statorique avait un spectre enrichi par la création d'un court-circuit au stator les fréquences additionnelles sont donné par :

$$f_{cc} = (k \pm n(1-g)/p)f_s$$

Avec $k=1.3$ et $n=1.2.3.....(2p-1)$

6.3.3.2 L'analyse du vecteur de Park

Cette méthode permet le diagnostic de la machine asynchrone triphasée en calculant des courants électriques dits de Park. A partir des courants de phase $i_{as}(t)$, $i_{bs}(t)$ et $i_{cs}(t)$ les courants de Park $i_d(t)$ et $i_q(t)$ peuvent être calculés en utilisant les deux relations suivantes [1a] [18a][19a][20a]

$$\begin{cases} i_{ds}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{as}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot i_{bs}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot i_{cs}(t) \\ i_{qs}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_{bs}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_{cs}(t) \end{cases} \quad (I.1)$$

6.3.3.3 Analyse spectrale de la puissance instantanée statorique

Cette méthode est basée sur la détection des composantes fréquentielles générées sur le spectre de la puissance instantanée statorique, leur cause est le déséquilibre crée par les défauts affectant les différentes parties de la machine. On peut exploiter le contenu spectral de la puissance instantanée partielle (puissance instantanée d'une phase statorique) qui est égale au produit d'un courant de ligne par une tension entre ligne [21a].

$$P_0(t) = u_{ab}(t) \cdot i_{ab}(t) \quad (I.2)$$

$u_{ab}(t)$: la tension entre deux phases

$i_{ab}(t)$: le courant de ligne

6.3.3.4 Estimation paramétrique

Cette méthode de diagnostic se base sur un modèle de connaissance. Ainsi, en utilisant ces paramètres structuraux, elle peut extraire par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défaillances de la machine. En effet, le type de défaut que l'on voudra détecter dépend du modèle de connaissance utilisé. Les premiers modèles utilisés étaient relativement simples (modèle de Park par exemple [18a]). Ils n'avaient besoin que de quatre paramètres pour effectuer le diagnostic de défaut ce qui, dans certains cas, ne permettait pas de localiser la défaillance avec précision. Il a été donc, nécessaire de passer à un

modèle de connaissance plus fin de la machine. On trouve, ainsi, des modèles triphasés ou encore des modèles à n phases.

6.3.3.5 Reconnaissance des formes

Les méthodes de diagnostic utilisant la reconnaissance des formes sont peu nombreuses à ce jour. Un vecteur de forme est un vecteur qui contient plusieurs paramètres extraits à partir des mesures. Les observations, décrites par le vecteur de forme, peuvent être classées en se basant sur des règles de décision selon les modes de fonctionnement avec et sans défaut. Il faut donc, disposer d'une base de données permettant de classer ces observations pour tel ou tel fonctionnement (fonctionnement sain à 0% de défaut et fonctionnement à 100% de défaut). Une autre méthode consiste à calculer les paramètres du vecteur de forme en effectuant des simulations numériques de la machine étudiée [1a].

6.3.3.6 Analyse temps-fréquence et temps-échelle

Ces deux techniques ont vu le jour à cause de la non-stationnarité des signaux surtout pour les machines fonctionnant à des couples de charges variables.

6.3.3.6.1 Analyse temps-fréquence

En supposant que le courant de la machine asynchrone est un signal non stationnaire (cas d'un couple de charge variable), les techniques utilisant la transformée de Fourier ne seront pas suffisantes pour représenter ce type de signal. Ces dernières années, les transformations temps-fréquence ont vu le jour, constituant, ainsi, une méthode efficace pour traiter les signaux à caractère non-stationnaire [13a]. En 1999, une méthode d'analyse temps-fréquence adaptative pour détecter les barres rotoriques cassées et les défauts de roulement a été proposée. L'idée fondamentale de cette méthode est de transformer le courant de la machine en une représentation temps-fréquence pour capturer la variation dans le temps des composantes spectrales. Cette méthode doit être suivie par une analyse statistique du spectre, pour comparer les conditions de fonctionnement actuel aux conditions de fonctionnement normal de la machine [1a]. Les phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquences différents rencontrés dans un signal, peuvent être détectés à l'aide de cette méthode. Ce signal peut être, par exemple, le courant statorique de la machine asynchrone. L'idée clé est de décomposer le signal en utilisant des fonctions analysantes particulières construites à partir d'une ondelette mère oscillante et à moyenne nulle [1a]. A partir de l'ondelette mère, il est possible de créer des ondelettes analysantes centrées autour d'une valeur et à échelle variable limitée [22a].

7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur les énergies renouvelables, et d'une façon précise sur l'énergie éolienne. Puis nous avons établi un comparatif entre les deux grandes familles d'éoliennes existantes, à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontales, et un bref aperçu sur les différents éléments d'une éolienne. En suite, On a présenté la structure d'une machine asynchrone à double alimentation ainsi que ses différentes structures d'alimentation et leurs modes de fonctionnement pour les deux vitesses (fixe, variable) et le domaine d'application. Aussi, ses avantages et inconvénients.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

On trouve donc que cette configuration est intéressante à l'exploitation dans un système éolien, elle nous permet une variation à 100% de la vitesse en utilisant des pales orientables, elle est aussi intéressante du point de vue coût en réduisant la taille des convertisseurs, en suite nous avons présenté les différents défauts apparaissant au niveau de la machine asynchrone.

1. INTRODUCTION

Un intérêt sans cesse croissant est de plus en plus accordé à la machine asynchrone à Double alimentation au détriment des autres machines. En effet, cette machine est devenue le choix par excellence de la majorité des centrales éoliennes, grâce à son prix et sa robustesse. Cependant, elle a une dynamique très complexe à cause des interactions stator rotor, ce qui rend la modélisation basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant insuffisante pour décrire son comportement dynamique. De nouvelles méthodes tel que la méthode du vecteur spiral et la modélisation dans le repère de Park sont développées et devenus la base pour la modélisation, la simulation et la commande des machines à induction. Les onduleurs à source de tension ont été habituellement considérés comme les convertisseurs de puissance les plus adaptés aux entraînements à courant alternatif. Principalement, parce que ces onduleurs peuvent être appliqués facilement pour les systèmes à modulation de largeur d'impulsions (MLI). De même, il assure une commande du moteur facile et effective puisque son circuit de puissance offre la possibilité de travailler sur une large gamme de fréquences et de tensions de charge. C'est pourquoi l'étude de l'association onduleur-moteur asynchrone constitue un vaste thème de recherche dans les laboratoires d'électrotechnique. La majorité de ces travaux ont conduit d'une part, à améliorer la conception des onduleurs et d'autre part à développer de nouvelles techniques de commande des onduleurs améliorant ainsi les performances de cette association. Dans le souci de fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les redresseurs à MLI sont proposés comme solution avancé de dépollution des réseaux électriques. En effet, les redresseurs àMLI peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur. Dans le présent chapitre nous nous intéresserons à la modélisation dynamique de la machine asynchrone à double alimentation, et plus précisément la modélisation par la méthode de R.H Park,et la modélisation des convertisseurs statiques « onduleur MLI, redresseur à hystérésis ».

2.Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge (le vent).Elle se compose comme une machine asynchrone d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile. Le stator a trois (03) enroulements couplés en étoile ou en triangle qui sont alimentés par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ

magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ où ω_s désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé, et P est le nombre de paire de Pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator. Le rotor qui est exécuté comme le stator, supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôle, couplé en étoile. Le rotor tourne à la vitesse : $\Omega_r = \frac{d\theta}{dt}$ par rapport au stator, avec θ est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique. La représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation est montrée sur la Figure (II.1). La machine asynchrone à double alimentation étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité.

2.1. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone sera établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes[33].

- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoches négligeable.
- La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements sont constantes et l'effet de peau négligeable.
- On admet que la f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- La machine est symétrique, par conséquent, la somme des courants et des tensions est égale à zéro.
- Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :
 - L'additivité des flux,
 - La constance des inductances propres,
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques. La position du rotor en rotation, par rapport au stator fixe est fonction de la vitesse de rotation Ω , tel que $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$ où θ est l'angle entre l'enroulement statorique et l'enroulement rotor en chaque instant, comme montré sur la figure ci-dessous.

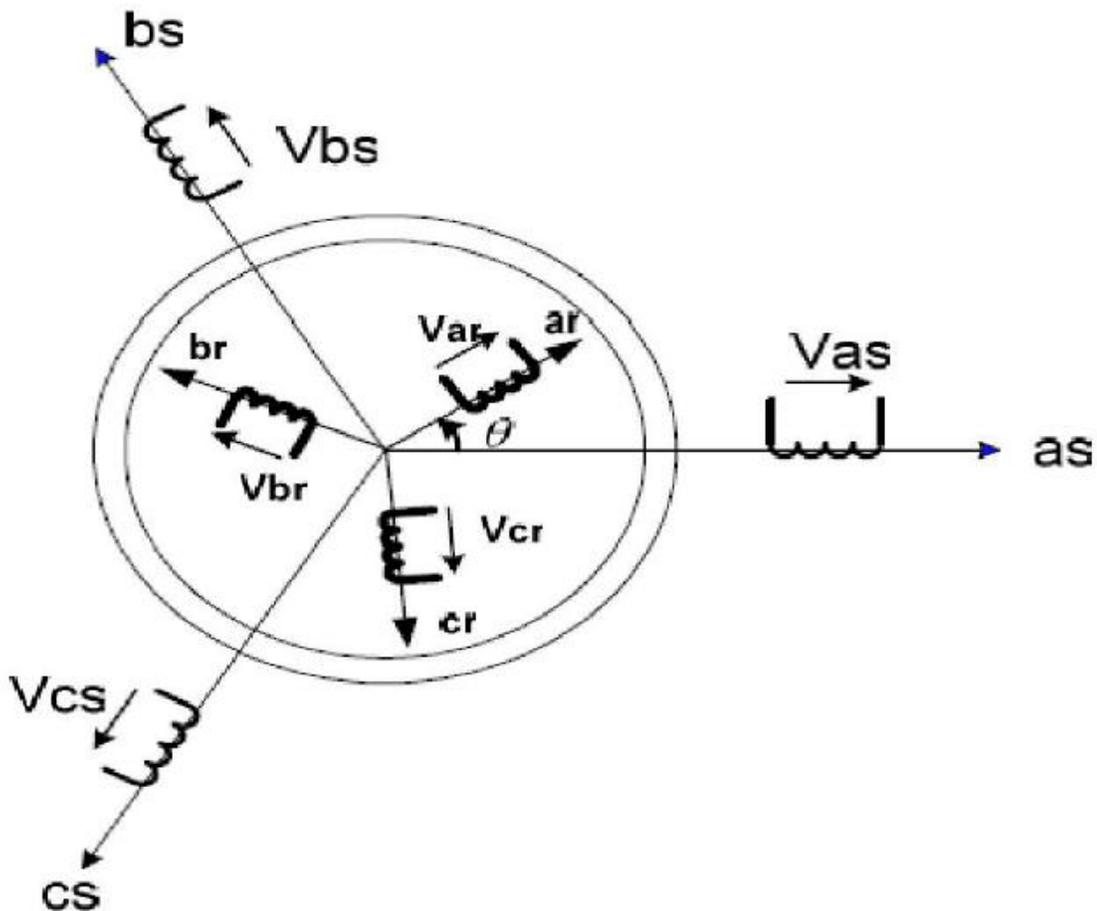


Figure (II.1). Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation

as, bs, cs : phase du stator.

Ar ,Br, Cr: phase du rotor.

En utilisant l'approche des circuits couplés magnétiquement, la loi d'Ohm et la loi de Faraday et en tenant compte des hypothèses cités ci-dessus, le comportement dynamique la MADA peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant[33] .

2.2. Equations électriques de la machine

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

Au stator :

$$[Vs] = [Rs] [Is] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (\text{II. 1})$$

Au rotor :

$$[V_r] = [R_r] [I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \quad (\text{II. 2})$$

$$[V_r] \neq 0$$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

Avec

$$\begin{aligned} [V_s] &= \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; & [I_s] &= \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; & [V_r] &= \begin{bmatrix} V_{Ar} \\ V_{Br} \\ V_{Cr} \end{bmatrix}; & [I_r] &= \begin{bmatrix} i_{Ar} \\ i_{Br} \\ i_{Cr} \end{bmatrix} \\ [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; & [R_r] &= \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; & [\phi_s] &= \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}; & [\phi_r] &= \begin{bmatrix} \phi_{Ar} \\ \phi_{Br} \\ \phi_{Cr} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

V_s, V_r : Tensions statoriques et rotoriques.

I_s, I_r : Courants statoriques et rotoriques.

ϕ_s, ϕ_r : Flux statoriques et rotoriques.

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

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

L_s, L_r : Inductances de fuites des statoriques et rotoriques.

M_s, M_r : inductances mutuelles.

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit:

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

En remplaçant (II.3) dans (II.1) et (II.2) on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] [i_s] + [M_{sr}] [i_r]) \\ [V_r] = [R_r] [i_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] [i_r] + [M_{rs}] [i_s]) \end{cases} \quad (II. 4)$$

2.3. Equations mécaniques de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante:

$$C_{em} = P [I_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] [I_r]) \quad (II. 5)$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit:

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega) \quad (II. 6)$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

2.4. Modèle de la MADA dans le repère dq

2.4.1. La transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système[34].

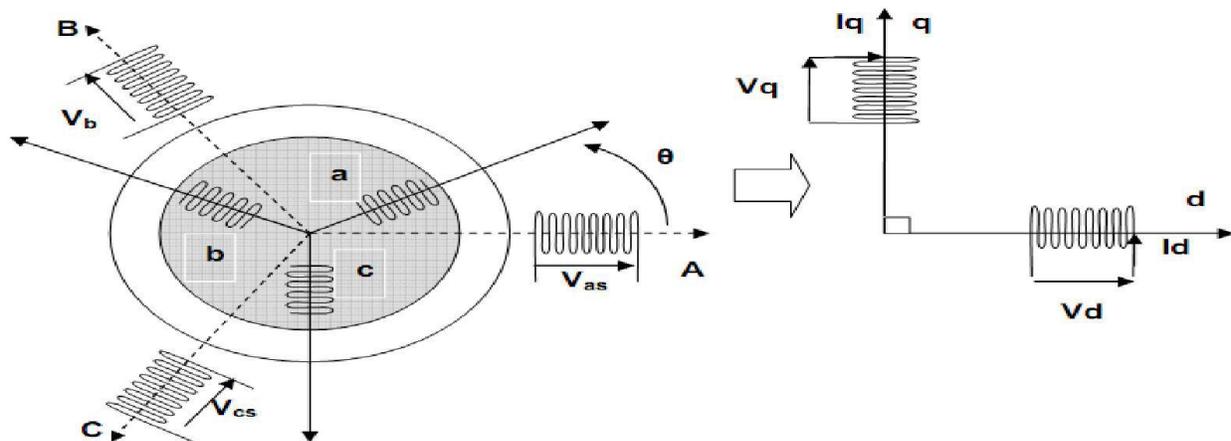


Figure (II.2). Passage du triphasé au biphasé La matrice de transformation est définie par :

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

L'angle θ est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que $[\mathbf{P}(\theta)]$ soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée.

$$[\mathbf{P}(\theta)]^{-1} = [\mathbf{P}(\theta)]^t$$

2.4.2. Modélisation de la MADA dans le repère de PARK

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante :

$$\begin{cases} [\mathbf{V}_{s(dq)}] = [\mathbf{P}(\theta_s)][\mathbf{V}_{s(abc)}] \\ [\mathbf{V}_{r(dq)}] = [\mathbf{P}(\theta_s - \theta)][\mathbf{V}_{r(abc)}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} [\mathbf{I}_{s(dq)}] = [\mathbf{P}(\theta_s)][\mathbf{I}_{s(abc)}] \\ [\mathbf{I}_{r(dq)}] = [\mathbf{P}(\theta_s - \theta)][\mathbf{I}_{r(abc)}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} [\phi_{s(dq)}] = [\mathbf{P}(\theta_s)][\phi_{s(abc)}] \\ [\phi_{r(dq)}] = [\mathbf{P}(\theta_s - \theta)][\phi_{r(abc)}] \end{cases}$$

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \mathbf{L}_s \mathbf{I}_{ds} + \mathbf{M} \mathbf{I}_{dr} \\ \phi_{qs} = \mathbf{L}_s \mathbf{I}_{qs} + \mathbf{M} \mathbf{I}_{qr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \mathbf{L}_r \mathbf{I}_{dr} + \mathbf{M} \mathbf{I}_{ds} \\ \phi_{qr} = \mathbf{L}_r \mathbf{I}_{qr} + \mathbf{M} \mathbf{I}_{qs} \end{cases} \text{ telque :} \quad (II.7)$$

$\mathbf{L}_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique

$\mathbf{L}_r = l_r - M_r$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

$\mathbf{M} = \frac{3}{2} M_{sr}$: Inductance cyclique rotorique.

Les équations électriques sont :

(II.8)

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt}$$

$$\theta_s = \theta_e \quad \text{et} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (II.9)$$

2.4.3. Choix de la référence

2.4.3.1. Référentiel lié au stator ($\theta_s = 0$)

$$\frac{d\theta_e}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (II.10)$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

2.4.3.2. Référentiel lié au rotor ($\theta_r = 0$)

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \theta$. Il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante. Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_e}{dt} = \omega \quad (II.11)$$

2.4.3.3. Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega_s$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines [35]. Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{array} \right. \end{cases} \quad (II.12)$$

$$\text{Avec: } \begin{cases} C_{em} = \frac{pM}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ \frac{J}{P} \frac{d\omega}{dt} = (C_{em} - C_r - C_f) \end{cases} \quad (II.13)$$

2.4.4. MISE SOUS FORME D'EQUATIONS D'ETAT

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état. Nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega]^t$ comme vecteur d'état et les grandeurs v_{dr}, v_{qr} comme variable de commande.[36].Après le calcul,nous aboutissons au système suivant:

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \cdot \chi \cdot \chi \cdot \Phi_{ds} - P \cdot \chi \cdot \chi \cdot \Phi_{qs} - \chi \cdot V_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma_r} \right) v_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \cdot \chi \cdot \chi \cdot \Phi_{qs} + P \cdot \chi \cdot \chi \cdot \Phi_{ds} - \chi \cdot V_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma_r} \right) v_{qr} \\ \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{ds} + \omega_s \Phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{d\omega}{dt} = p \frac{\mu}{J} (\Phi_{qs} \cdot i_{dr} - \Phi_{ds} \cdot i_{qr}) - \frac{f}{J} \omega - \frac{1}{j} C_r \end{cases} \quad (II.14)$$

Où les différents coefficients sont donnés par:

$$\alpha_s = \frac{R_s}{L_s}; \quad \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right); \quad \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s \cdot M^2}{L_s^2 \cdot \sigma_r}; \quad \chi = \frac{M}{L_s \cdot \sigma_r}; \quad \mu = \frac{3 \cdot M}{2 \cdot L_s}$$

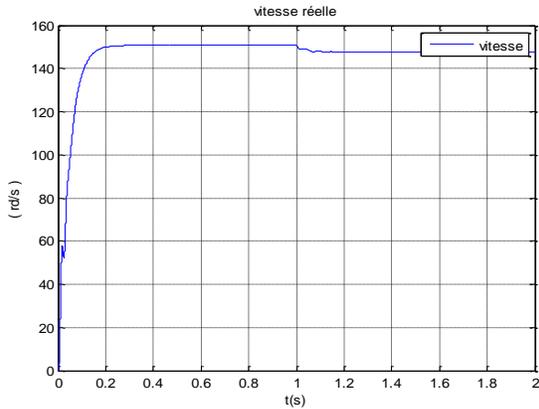
2.5. Résultat de simulation

La simulation numérique est bien connue aujourd'hui dans le domaine des machines électrique. Elle nous permet de modéliser, d'analyser et de simuler les systèmes avec beaucoup de précision. De nos jours il existe toute une panoplie de logiciels pour les

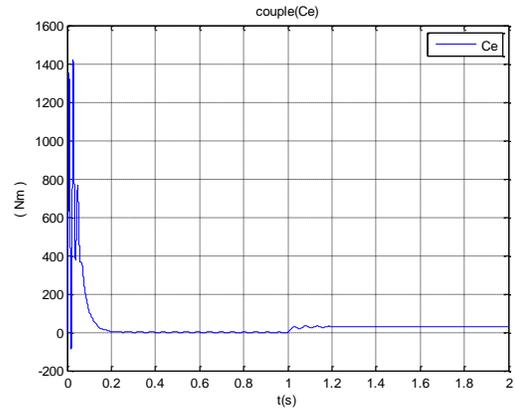
machines électriques. Afin de simuler la MADA, nous avons opté pour le logiciel MATLAB. Les données de la machine utilisée en simulation sont données en annexe. Nous avons simulé la MADA alimenté par le réseau en mode réel:

- Démarrage à vide et en appliquant un couple résistant à t= 1 sec égal au

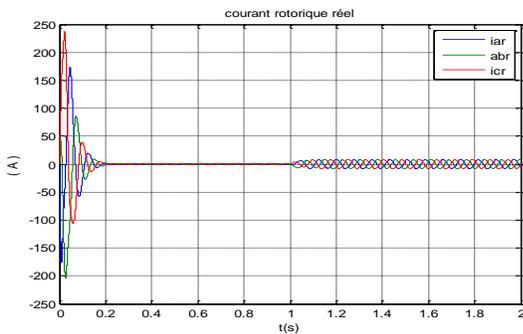
$$\text{Couple nominal}(C_r = C_{en} = \frac{|P_{en}|}{\Omega_n} = 26.N.m)$$



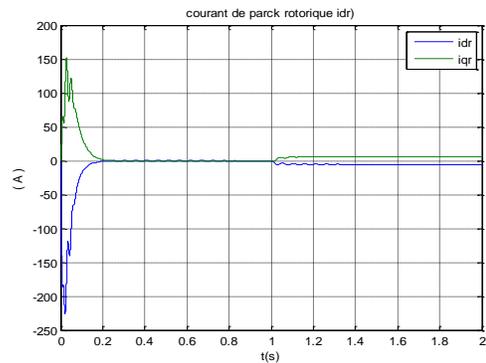
Fig(II.3) : Reponse de la vitesse mecanique



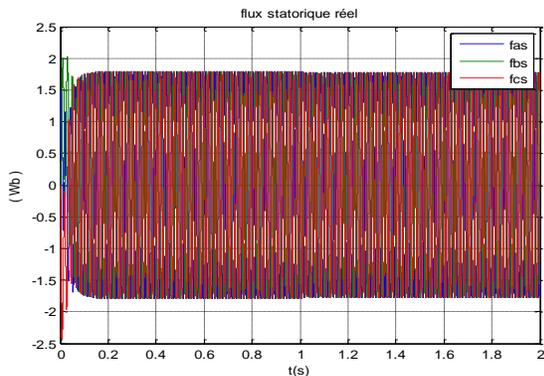
Fig(II.4) :reponse du couple electromagnetique



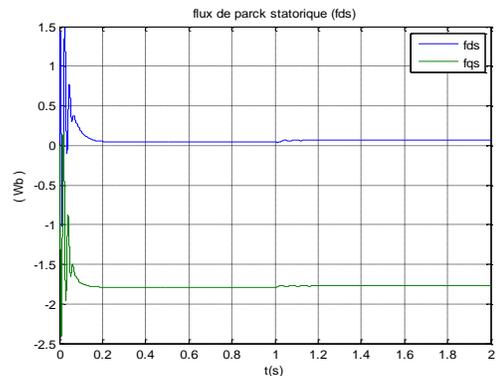
Fig(II.5) :les courants real rotoriques



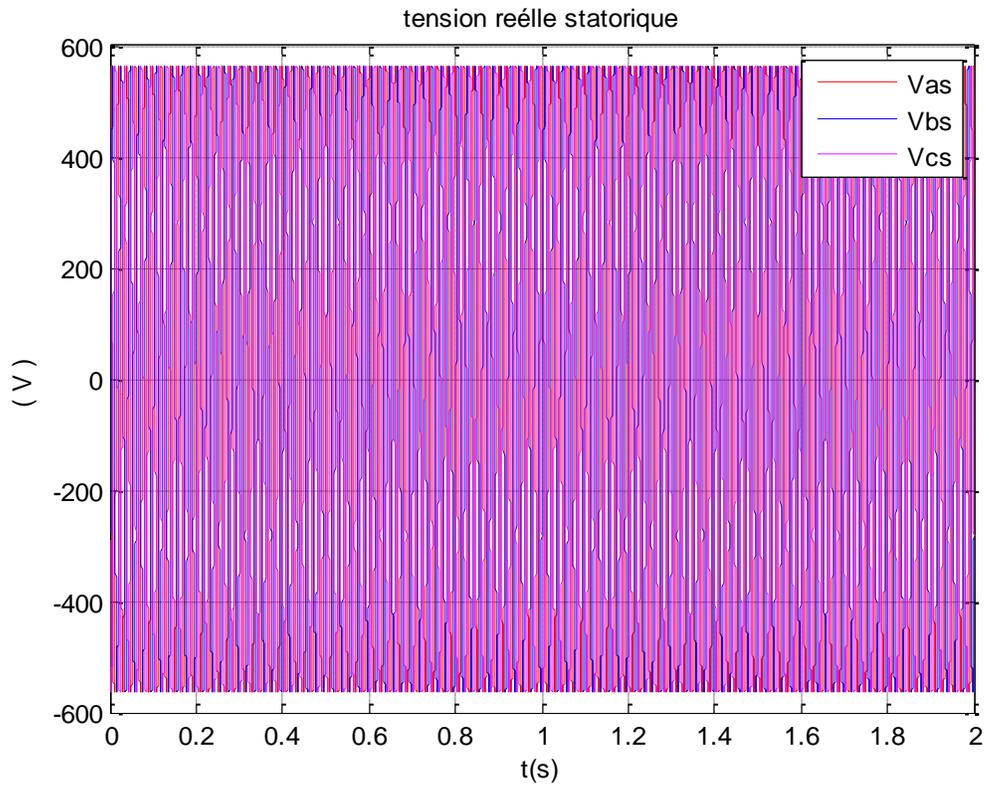
Fig(II.6) :les courants de park rotoriques



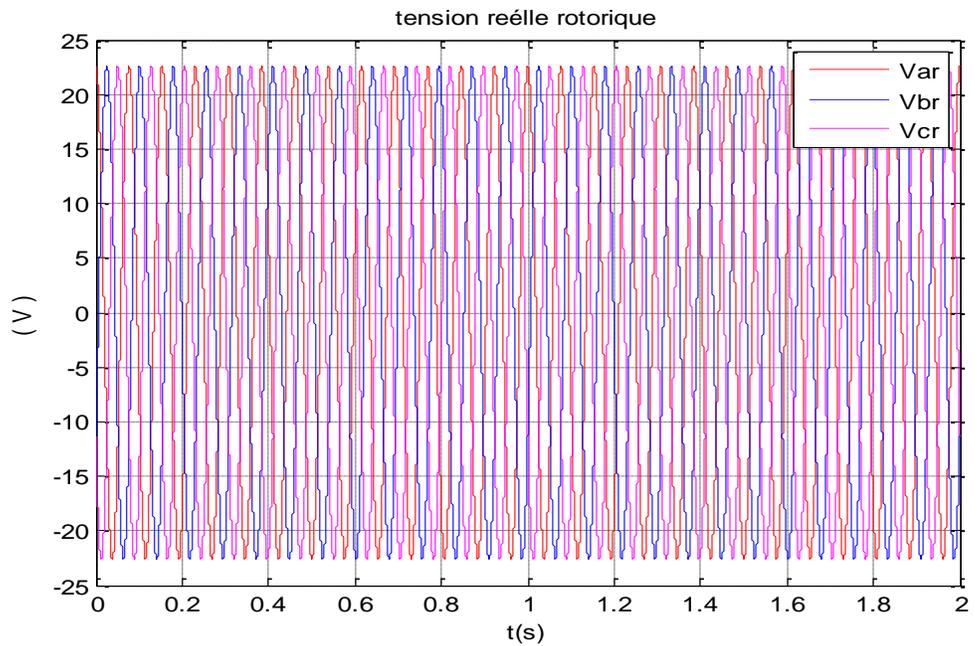
Fig(II.7) :les flux real statoriques



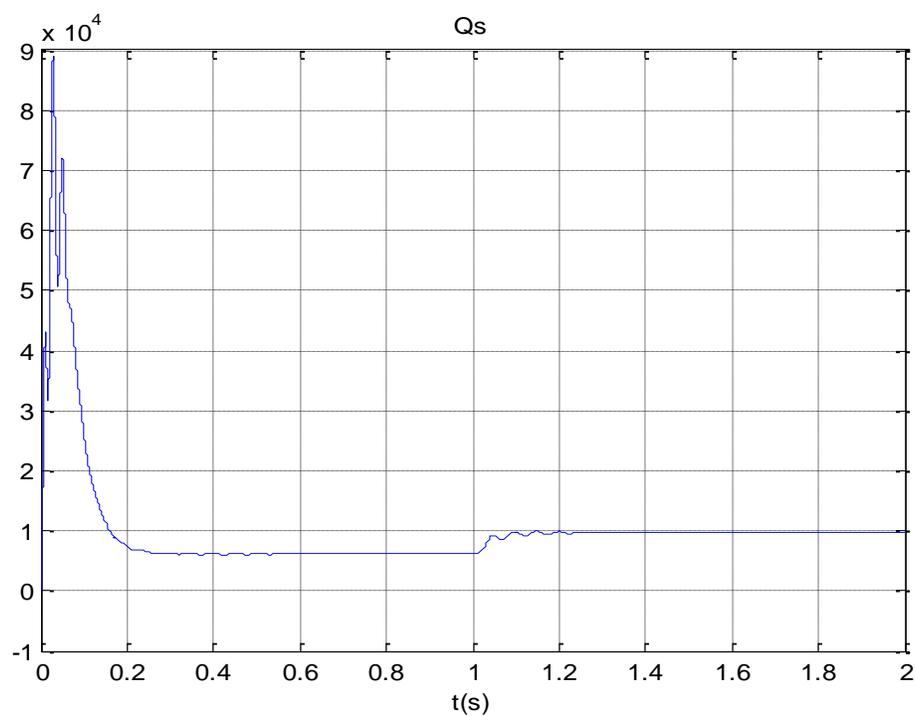
Fig(II.8)les flux de park statoriques



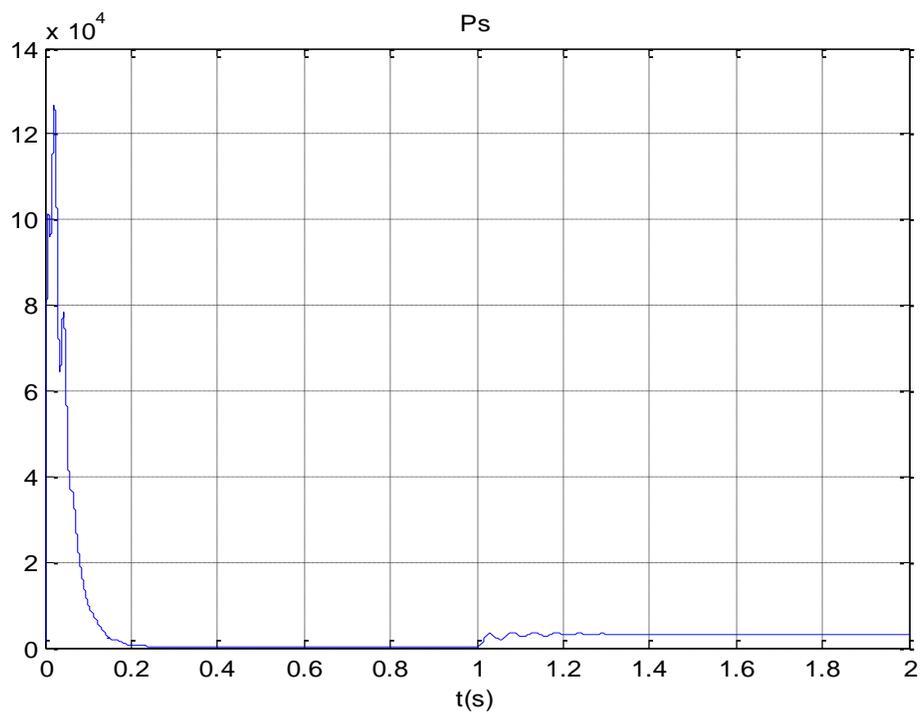
Fig(II.9)les tensions réelles statoriques



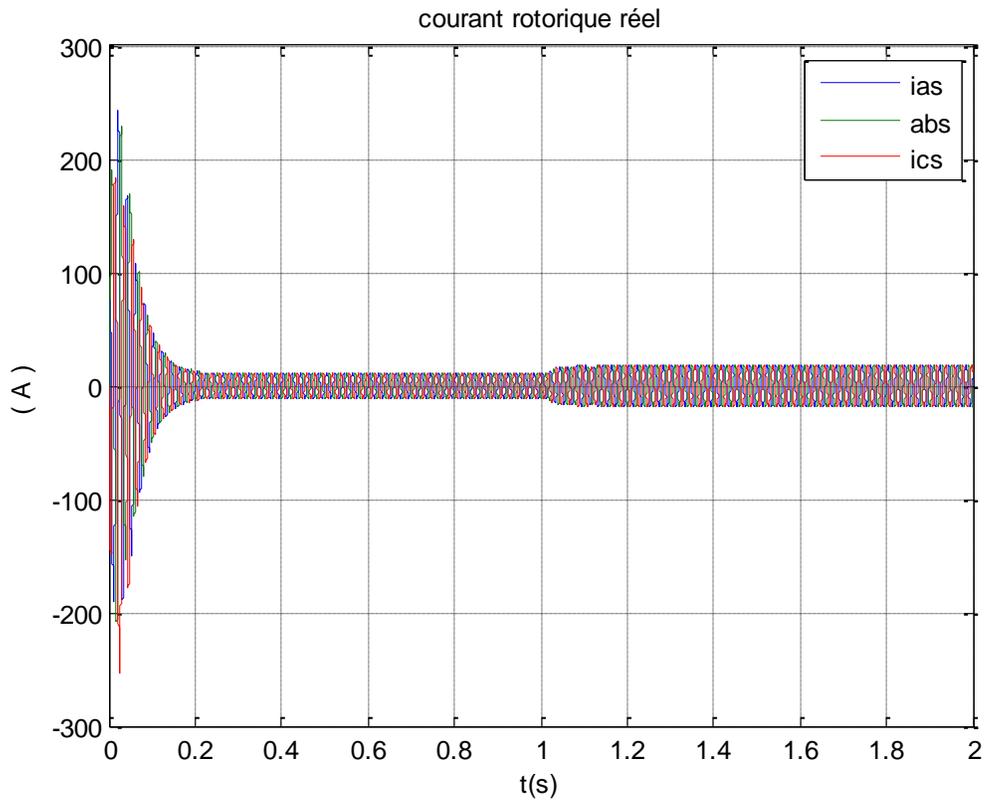
Fig(II.10)les tensions réelles rotoriques



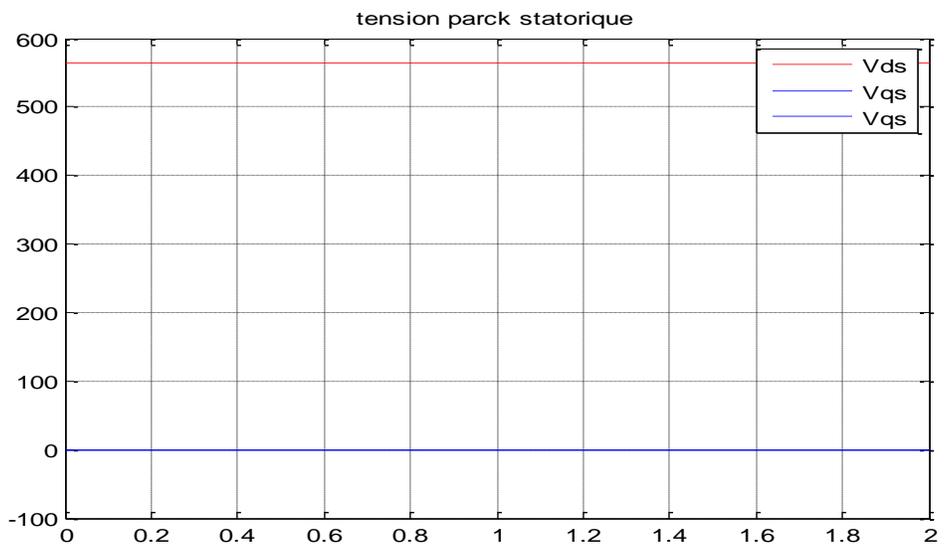
Fig(II.11)la puissances réactive statorique



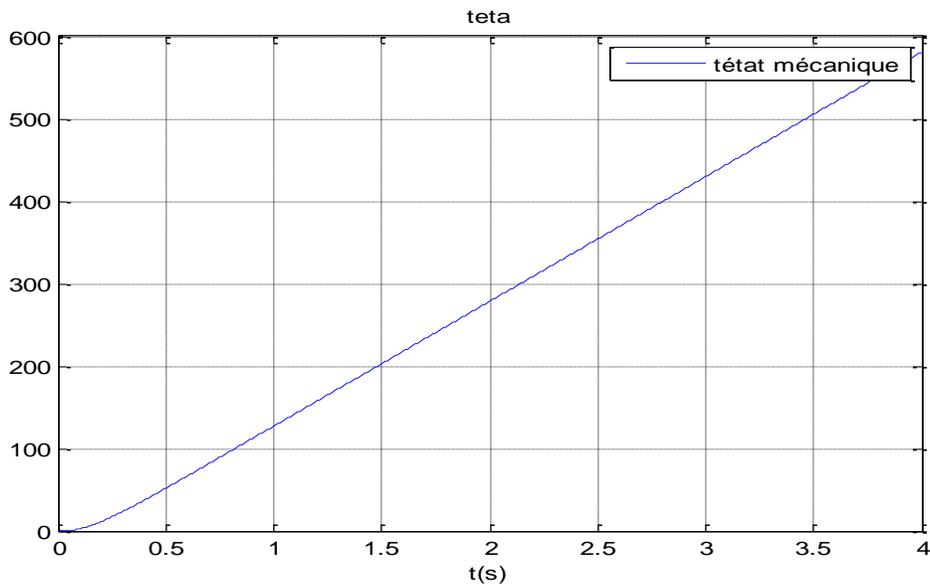
Fig(II.12)la puissances active statorique



Fig(II.13)les courants réels statoriques



Fig(II.14)les tensions de park statoriques



Fig(II.15) :reponse de l'angle mécanique

Interprétation

On remarque que toutes les grandeurs de la machine ont un régime transitoire oscillant. La vitesse réelle à vide atteint une valeur très proche de la vitesse nominale 150rad/s au bout d'un temps égal à 0.2s. Ce démarrage rapide a permis d'avoir un établissement rapide du couple électromagnétique au régime transitoire. Les courants rotoriques (i_{dr}, i_{qr}) se stabilisent à des valeurs proches de zéro au bout d'un temps égal à 0.2s, quant aux flux statorique (Φ_{ds}, Φ_{qs}) ils prennent tous des régimes transitoires oscillatoires et se stabilisent aux valeurs respectivement de 0.1Wb, -1.75 Wb. Si on applique un couple résistant égale au couple nominale $C_r = C_{en} = 26\text{N.m}$ le couple électromagnétique augmente afin de compenser le couple résistant, cela induit une légère diminution de vitesse qui traduit un glissement supplémentaire correspondant au glissement nominal de la machine, et une augmentation du courant i_{qr} et diminution du courant i_{dr} . De même pour les flux statoriques (Φ_{ds}, Φ_{qs}) augmentent à l'instant de l'application de la charge, chose qui explique le couplage naturel existant entre le flux et le couple.

3. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (*DC/AC*). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique aujourd'hui. L'onduleur de tension à *MLI* permet d'imposer à la machine des tensions à amplitudes et fréquences variables à partir du réseau standard 220/380V, 50Hz. La structure du convertisseur statique qui alimente la machine est constituée essentiellement, d'un pont redresseur (*AC/DC*) connecté au réseau. Après redressement, la tension (étage continu) est filtrée par des composants passifs *C* ou *LC*, pour être finalement appliquée à l'onduleur. L'onduleur qui est connecté à la machine, est constitué de trois bras formés d'interrupteurs électroniques choisis essentiellement selon la puissance et la fréquence de travail. Chaque bras compte deux composants de puissance complémentaires munis de diode montée en anti parallèle. Un temps de retard doit exister pratiquement entre les interrupteurs hauts et bas d'un même bras afin d'éviter le court-circuit de la source continue. L'onduleur est commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (*MLI*), appelée en anglais (*Pulse Width Modulation PWM*). Il existe plusieurs techniques *PWM*, commandées par les utilisateurs des machines électriques [37].

3.1. Modèle mathématique de l'onduleur de tension

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_i ($i = a, b, c$):

- $S_i = 1$: le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i = 0$: le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions V_{io} en fonction des signaux de commande s_i et en tenant compte du point fictif « 0 » représenté sur la Figure (II.12)

$$v_{io} = V_{dc} \left(S_i - \frac{1}{2} \right) \tag{II.15}$$

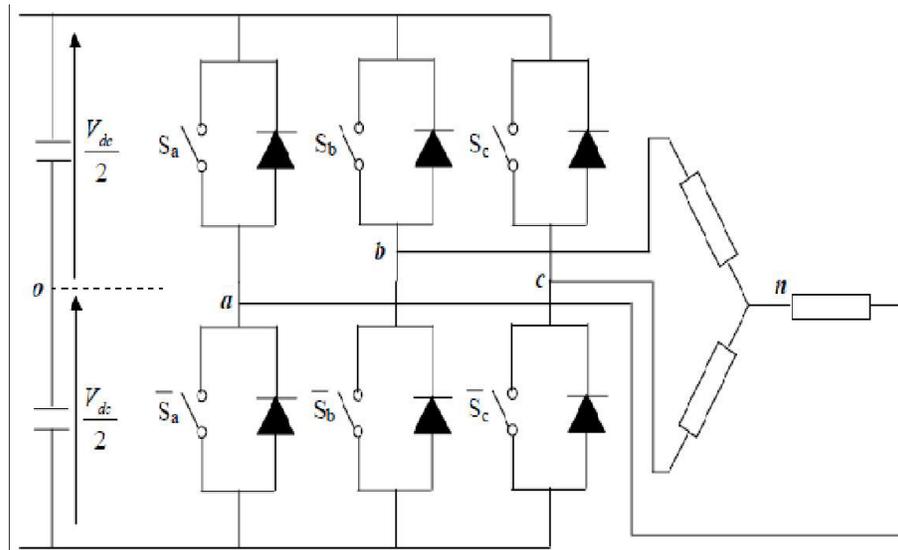


Figure (II.12).L'onduleur de tension associé à La machine

Soit 'n' le point neutre du côté alternatif, alors les trois tensions composées : v_{ab} , v_{cb} et v_{ca} Sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{an} - v_{bn} \\ v_{bc} = v_{bn} - v_{cn} \\ v_{ca} = v_{cn} - v_{an} \end{cases} \quad (II.16)$$

La charge constituée par la machine est équilibrée, ($v_{an}+v_{bn}+v_{cn}=0$) on aura donc:

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}(v_{ab} - v_{ca}) \\ v_{bn} = \frac{1}{3}(v_{bc} - v_{ab}) \\ v_{cn} = \frac{1}{3}(v_{ca} - v_{bc}) \end{cases} \quad (II.17)$$

En faisant apparaître le point« 0 », les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{cases} v_{ab} = (v_{ao} - v_{bo}) \\ v_{bc} = (v_{bo} - v_{co}) \\ v_{ca} = (v_{co} - v_{ao}) \end{cases} \quad (II.18)$$

En remplaçant (II.18) dans (II.17) on obtient :

$$\begin{Bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{Bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Des relations suivantes:

$$\begin{cases} v_{ao} = (v_{an} - v_{no}) \\ v_{bo} = (v_{bn} - v_{no}) \\ v_{co} = (v_{cn} - v_{no}) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

L'utilisation de l'expression (II.15) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Les techniques *MLI* ou (*PWM*) ont été l'objet de recherches intensives, un nombre important de méthodes, différentes de par leurs concepts et leurs performances ont été développées. Le choix d'une technique dépend du type de la machine à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et la simplicité d'implantation de l'algorithme. Ce sont finalement des critères de coût et de performance qui vont déterminer ce choix. Les critères de performances permettant d'évaluer et de comparer les qualités des différentes techniques *PWM*. Ils se résument en [61] :

- Le facteur de distorsion harmonique et le spectre harmonique de courant
- Le spectre harmonique de couple
- les pertes par commutation

Parmi les nombreuses techniques *PWM*, deux d'entre elles sont considérées dans notre travail, la *STPWM* et la *SVPWM*.

3.2. La technique de modulation «Sinus-triangle» (*STPWM*)

La modulation triangulo-sinusoidale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersective puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoidale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoidale. Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance [38]. Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoidale :

- L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence:

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{II.22})$$

- Le coefficient de réglage r qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse:

$$r = \frac{V_p}{V_r} \quad (\text{II.23})$$

3.3.resultats de similation de l'onduleur

La simulation de l'ensemble redresseur-onduleur-machine est une tâche primordiale. Le logiciel MATLAB est choisi, où la méthode d'Euler est utilisée pour résoudre le système différentiel. Le but de cette simulation est d'analyser le comportement de la machine alimentée directement par le réseau standard, et puis à travers le redresseur MLI commandé par hystérésis en courant et l'onduleur de tension commandé par modulation de la largeur d'impulsions STPWM qui sera considéré par la suite. On applique un couple de charge à $t= 1\text{sec}$ de valeur égale au couple nominal $C_r = 26 \text{ Nm}$.

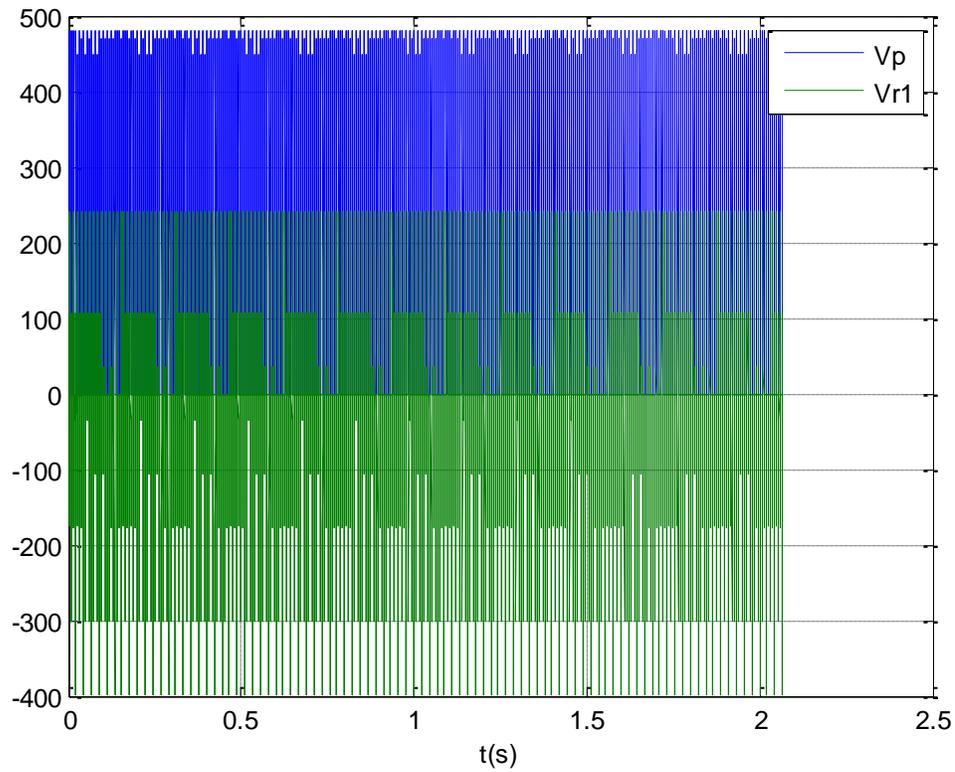
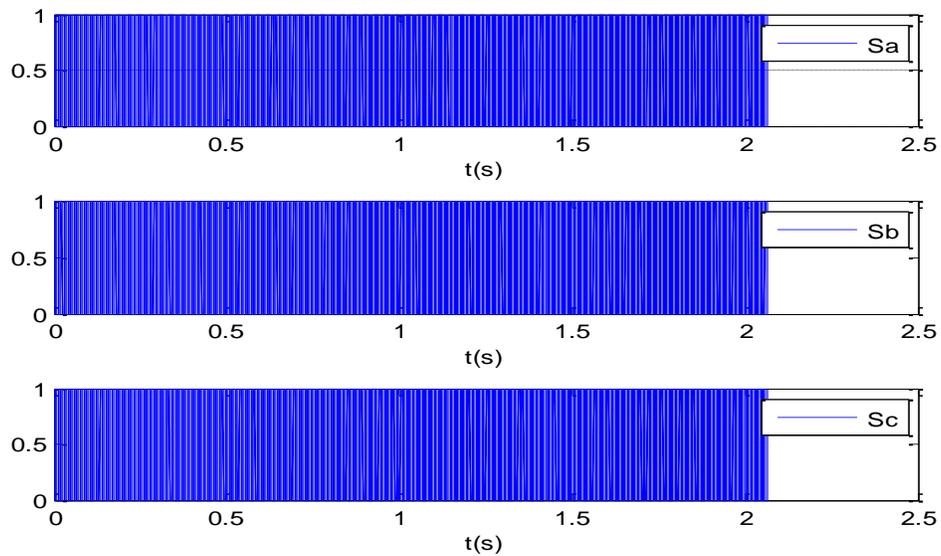


Figure (II.13) :les tensions de reference et la porteuse



Fig(II.14) :bras des interrupteurs

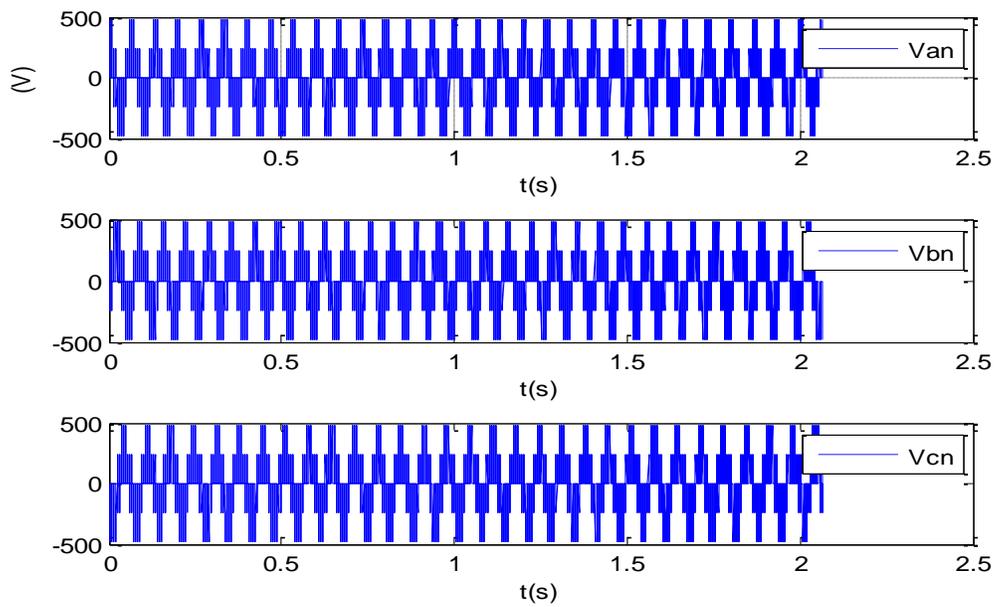


Fig.(II.15) : Principe de la commande PWM- intersective.

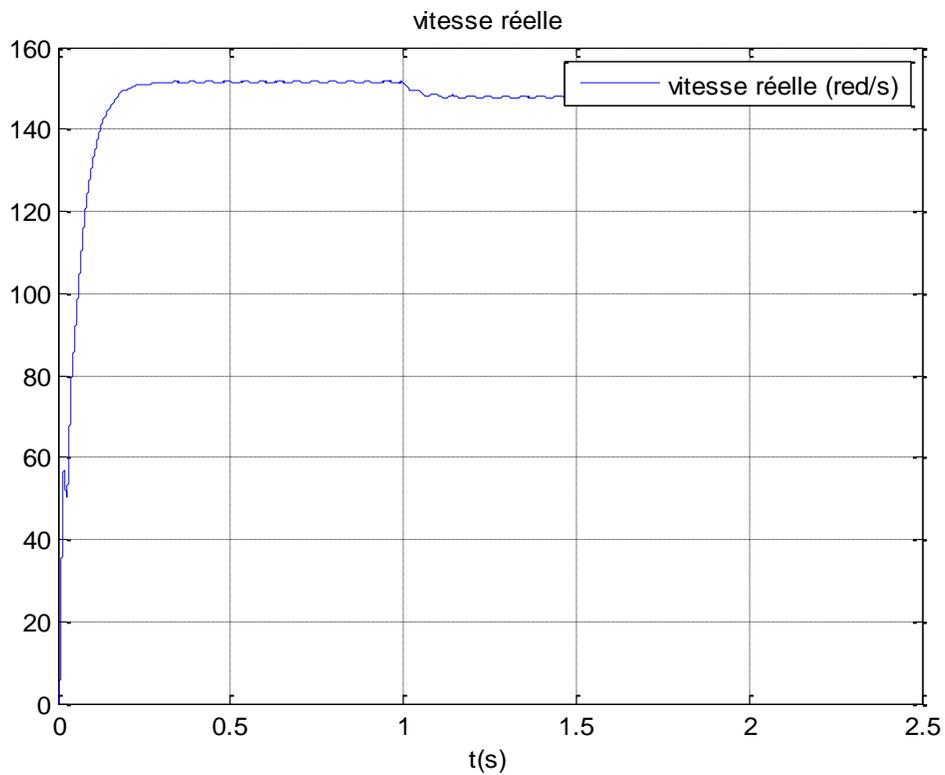
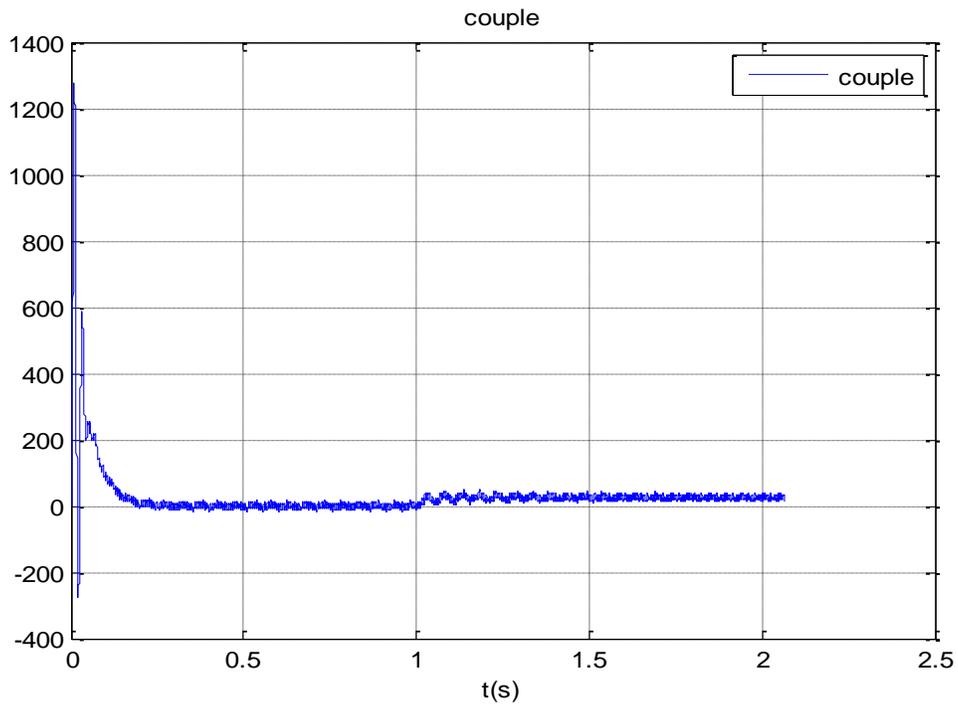


Fig.(II.16) : reponse de la vitesse mecanique alimentee par l'onduleur



Fig(II.17) :couple electromagnetique alimente par MLI

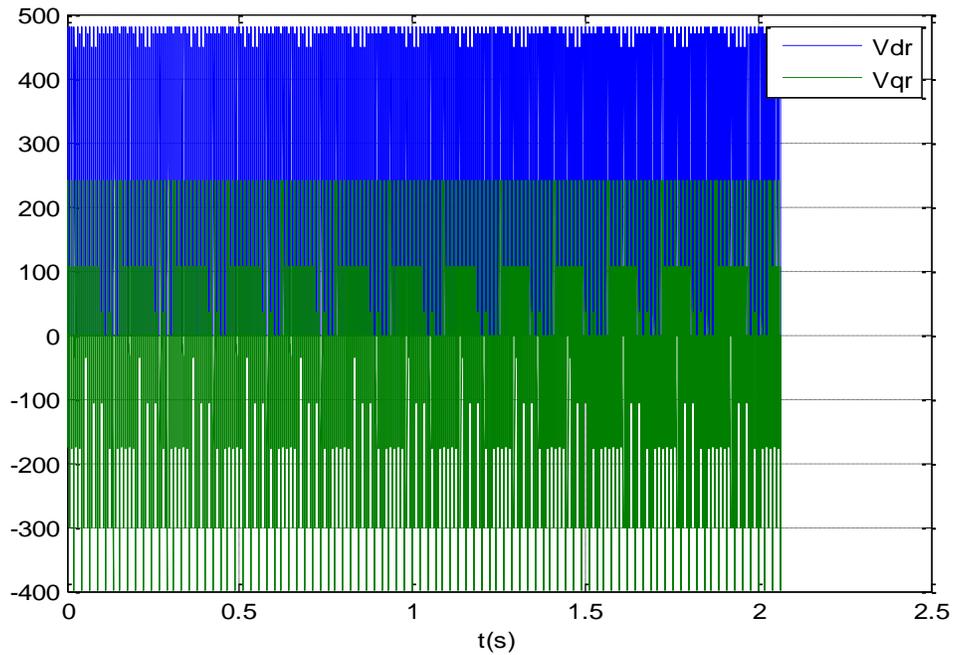
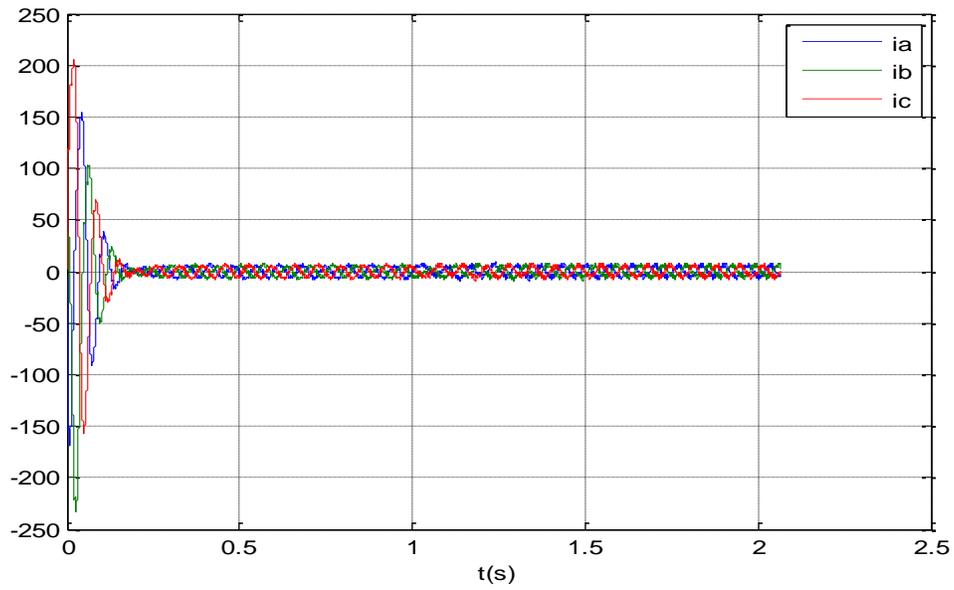
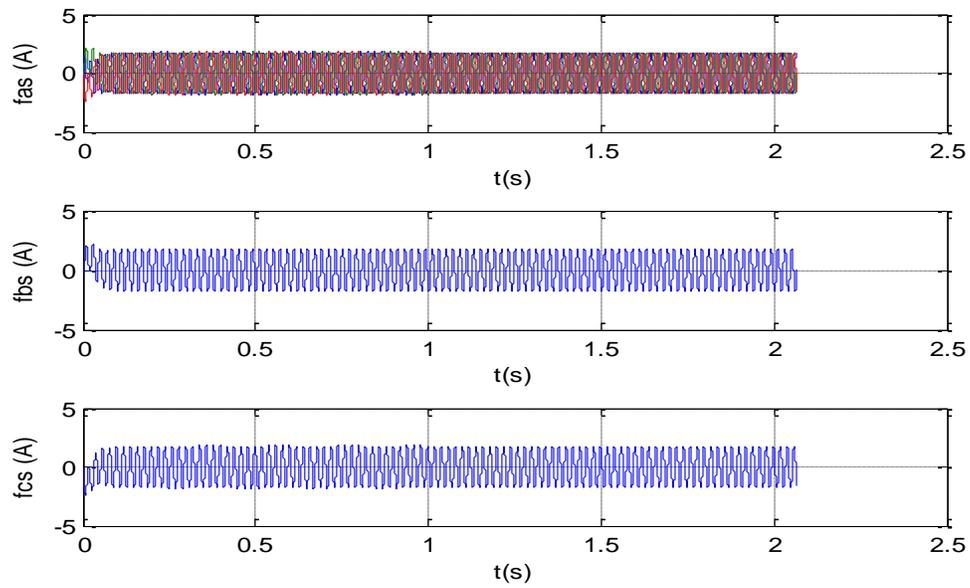


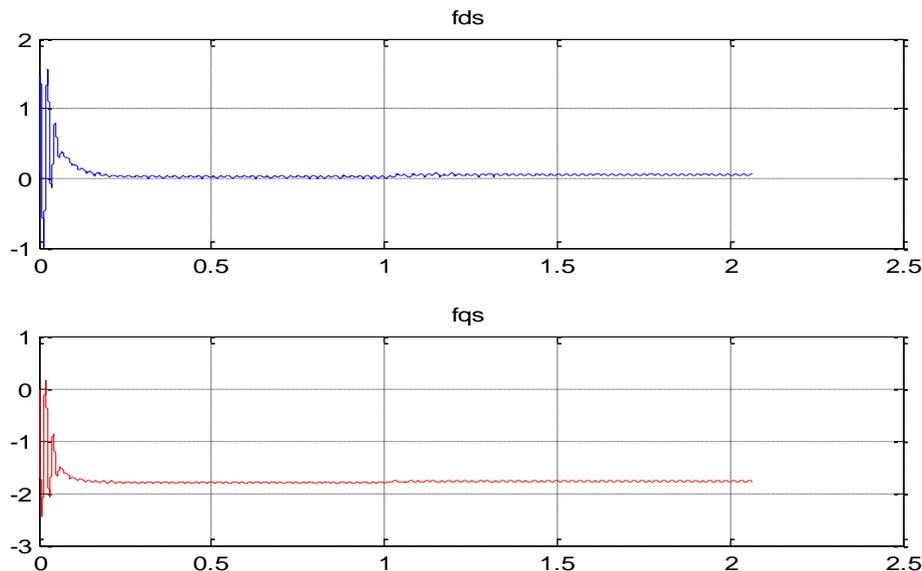
Fig.(II.18) : tensions de park rotoriques a la sortie de MLI



Fig(II.19) :courants réels statoriques en présence de MLI



Fig(II.20) :flux statoriques reels en presence de PWM



Fig(II.21) :flux de parck en presence de PWM

4.Modélisation de redresseur MLI à bande hystérésis

Afin de pouvoir disposer d'une tension continue pour alimenter l'onduleur qui pilote la machine asynchrone à double alimentation, nous avons choisi d'utiliser un redresseur à modulation de Largeur d'Impulsion [39], [40], [41], pour 2 raisons principales:

- Utiliser un redresseur réversible en courant afin de permettre le transfert de la puissance de glissement entre le rotor et le réseau, ce qui permet les fonctionnements en hyper ou hypo synchronisme.
 - Mettre en œuvre un redresseur qui génère peu ou pas de perturbation sur le réseau Electrique par propagation de courants harmoniques. Toutes les stratégies de commande possibles utilisées avec l'onduleur triphasé à deux niveaux [42], [43] sont aussi utilisables pour la commander du redresseur triphasé à deux niveaux. On distingue pour le convertisseur à deux niveaux[44] les stratégies suivantes :
- ✓ Triangulo-sinusoidale à échantillonnage naturel et régulier.
 - ✓ Commande optimisée avec ou sans la double modulation.
 - ✓ Commande algébrique et vectorielle.
 - ✓ Commande par hystérésis en courant.

Dans cette partie de notre travail, nous avons choisi la stratégie de commande par hystérésis

pour commander notre redresseur, afin d'avoir un courant de réseau pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension. La commande en courant par hystérésis présentée, présente une bonne dynamique, une implantation simple.

4.1. Structure générale du redresseur MLI

La technologie employée consiste à modifier la structure interne du redresseur en remplaçant les thyristors par des interrupteurs entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture : transistor MOSFET pour les moyennes et petites puissances, transistors IGBT ou thyristor GTO pour les fortes puissances, en anti parallèle avec des diodes. Pour la commande on utilise la technique de la modulation de largeur d'impulsion. La Figure (II.22) montre le schéma de principe d'un redresseur MLI[42].

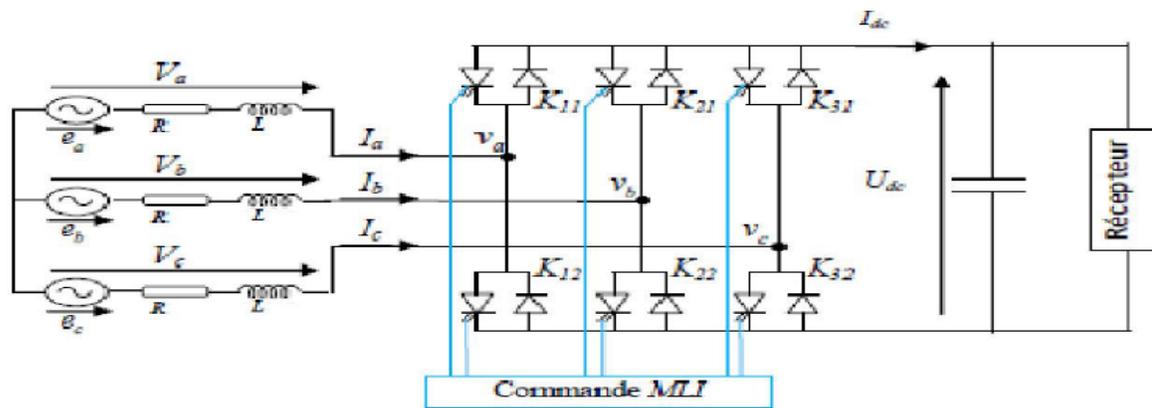


Figure (II.22). Schéma de principe d'un redresseur PWM

4.2. Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI

La réversibilité en courant de l'onduleur MLI de tension autorise son fonctionnement en redresseur MLI de courant. Il s'agit alors d'alimenter une charge (passive ou active) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant prélevé sur ce réseau étant sinusoïdale et éventuellement, en phase avec la tension. On peut donc, avec un redresseur MLI, obtenir un facteur de puissance très proche de l'unité. On peut aussi régler, par le contrôle, l'énergie réactive absorbée ou fournie. Toutefois, ce redresseur peut être à structure courant ou à structure tension. Le courant de ligne est commandé par la chute de tension de la ligne produite par l'inductance L , et la résistance R de la ligne et la tension d'entrée du redresseur v_{abc} . Le pont redresseur est constitué de trois bras chaque bras comporte deux transistors bipolaires (thyristors) en antiparallèles avec des diodes comme il est représenté dans la Figure (II.11),

chaque interrupteur peut être commandé en ouverture et en fermeture. La tension d'entrée v_{abc} , est en fonction des états de ces interrupteurs.

4.3 Modèle de redresseur MLI

Les tensions entre les lignes sont donnés par :

$$\begin{cases} v_{ab} = (s_a - s_b)u_{dc} \\ v_{bc} = (s_b - s_c)u_{dc} \\ v_{ca} = (s_c - s_a)u_{dc} \end{cases} \quad (II.24)$$

D'où on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{cases} v_a = f_a U_{dc} \\ v_b = f_b U_{dc} \\ v_c = f_c U_{dc} \end{cases} \quad (II.25)$$

Avec

$$\begin{cases} f_a = \frac{2s_a - (s_b + s_c)}{3} \\ f_b = \frac{2s_b - (s_b + s_c)}{3} \\ f_c = \frac{2s_c - (s_b + s_a)}{3} \end{cases} \quad (II.26)$$

4.4.Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé

Les équations de tensions pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites

comme:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

Et la tension d'entrée du redresseur peut être écrite comme suit : $v_n = U_{dc} (s_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n)$

(II.28)

$n = a$ ou b ou c

4.5. Le récepteur (la charge)

Ce bloc est constitué d'une capacité C (pour diminuer les ondulations de la tension redressée) placée en parallèle avec une résistance R, modélisant la charge continue Figure(II.11). La tension U_{dc} aux bornes de la charge et le courant redressé, est donnée par les deux expressions (II.29) et (II.31). Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_c \quad (II.29)$$

Le courant dans la capacité peut s'écrire aussi:

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (II.30)$$

L'équation de i_{red} dépend de la nature de la charge :

➤ A vide: $i_{ch} = 0$

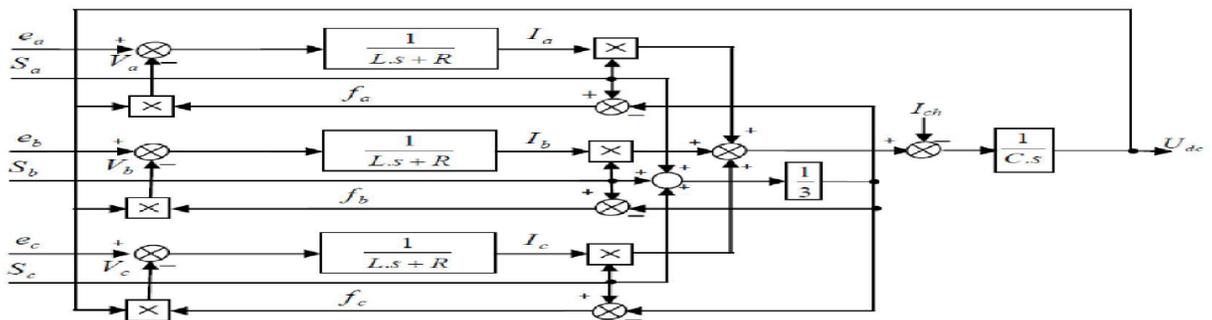
➤ Pour une charge résistive R:

$$i_{ch} = \frac{U_{dc}}{R} \quad (II.31)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b - s_c i_c \quad (II.32)$$

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - U_{dc} (s_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n) = e_a - U_{dc} (s_a - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c)) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - U_{dc} (s_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n) = e_b - U_{dc} (s_b - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c)) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - U_{dc} (s_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n) = e_c - U_{dc} (s_c - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c)) \end{cases} \quad (II.33)$$

La combinaison des équations (II.32), (II.33) nous permet de tracer le schéma fonctionnel



Fig(II.23) :schéma fonction d'un redresseur PWM

du régulateur produit les ordres de commande pour les transistors du redresseur comme l'indique la tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence U_{dc-ref} . La sortie Le contrôle de la tension continue U_{dc} exige une boucle d'asservissement fermée. Pour cela, il faut régler cette tension de sortie en fonction de la charge utilisée. Pour accomplir cette tâche, la Figure (II.24) [44].

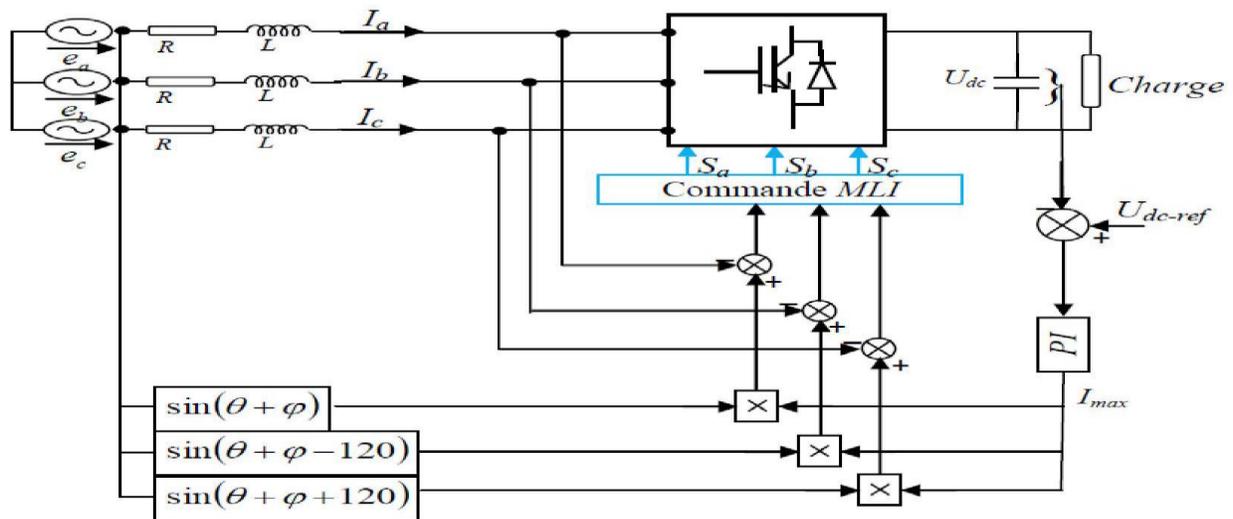


Figure (II.24).Redresseur MLI triphasé et sa commande

4.6.Commande de redresseur MLI par hystérésis en courant

La stratégie de commande du courant par hystérésis est la solution la plus en convenable pour toutes les applications de contrôle du courant des redresseurs ou les besoins performance sont de plus en plus recherchés en particulier pour le cas des redresseurs de courant. Comme il est bien connu, cette technique de contrôle du courant la plus directe que l'on puisse imaginer, est qualifiée d'avoir une bonne précision.

4.6.1. Principe de commande par hystérésis en courant

Le principe du contrôle par hystérésis, consiste à maintenir le courant à l'intérieur d'une bande en cadrant sa référence. La différence entre le courant et sa référence est comparée à une bande fixe de largeur D_i appelée bande ou fourchette d'hystérésis. Cette méthode permet le contrôle de la fréquence de commutation des interrupteurs par action sur la largeur

Di c'est pourquoi les performances de cette stratégie sont fortement liées à la largeur Di de la bande d'hystérésis. Pour les redresseurs à deux niveaux, on a deux états de commande possibles pour un bras, et donc on utilise un régulateur à hystérésis à deux positions. L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$, et il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (ou largeur de la bande)d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre $-H/2$ et $+H/2$ (c'est-à-dire, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas. En utilisant la commande par hystérésis en courant dont l'algorithme est le suivant :

$$\varepsilon_k \geq \Delta_i \Rightarrow s_r = 0$$

$$\varepsilon_k \leq -\Delta_i \Rightarrow s_r = 1$$

$$\varepsilon_k = i_{ref} - i_{mes}$$

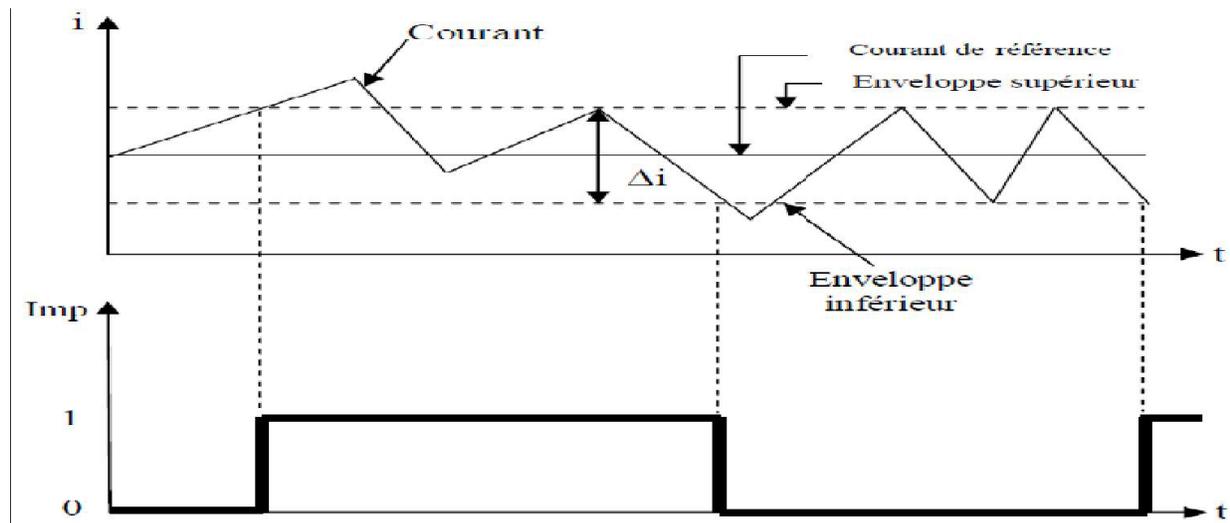


Figure (II.25). Principe du Contrôle par hystérésis.

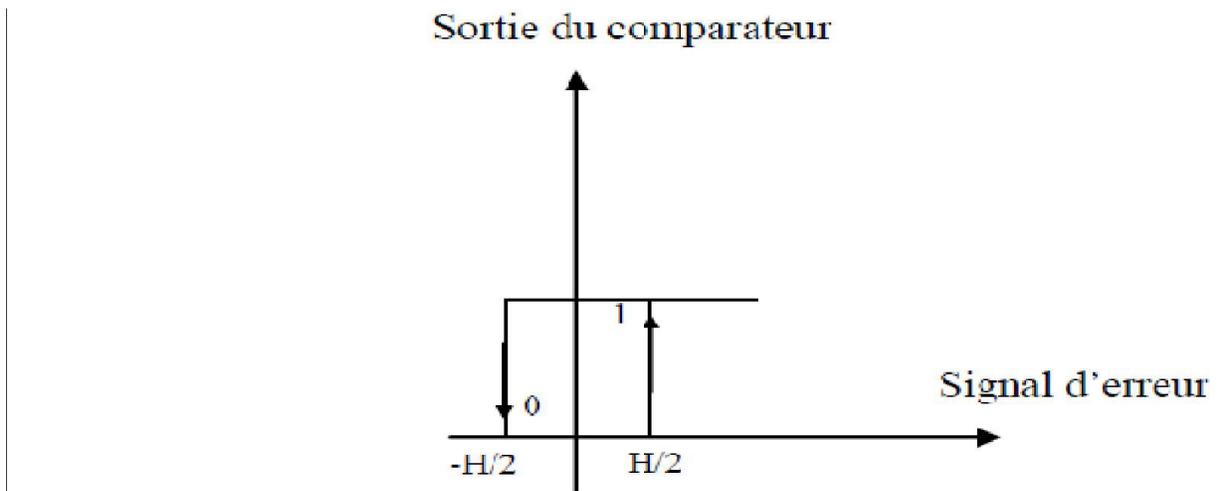


Figure (II.26). Modulateur MLI à bande d'hystérésis

4.6.2. résultats de simulation de bus continu et comparaison:

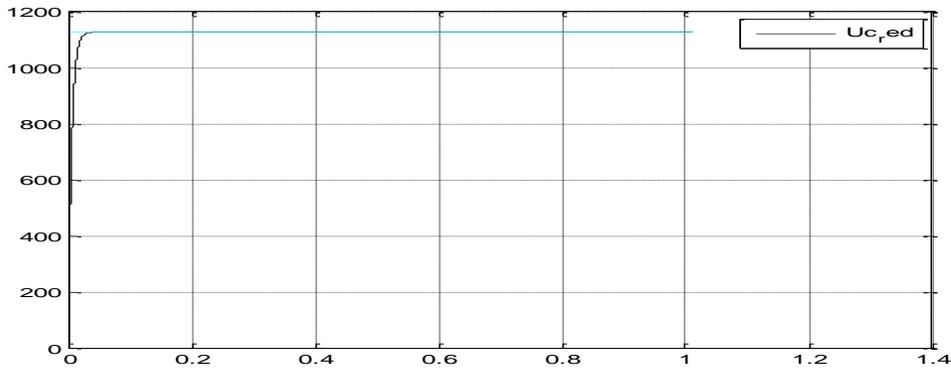
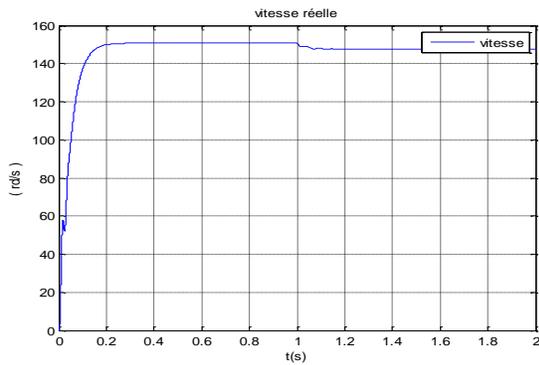
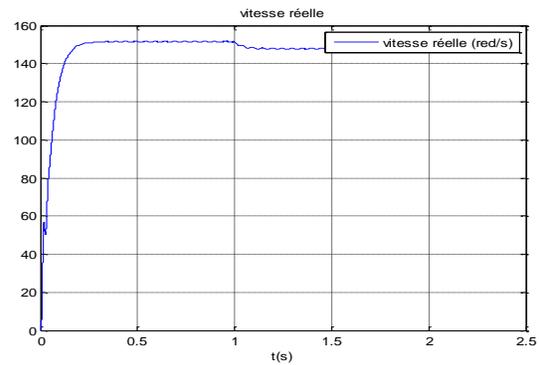


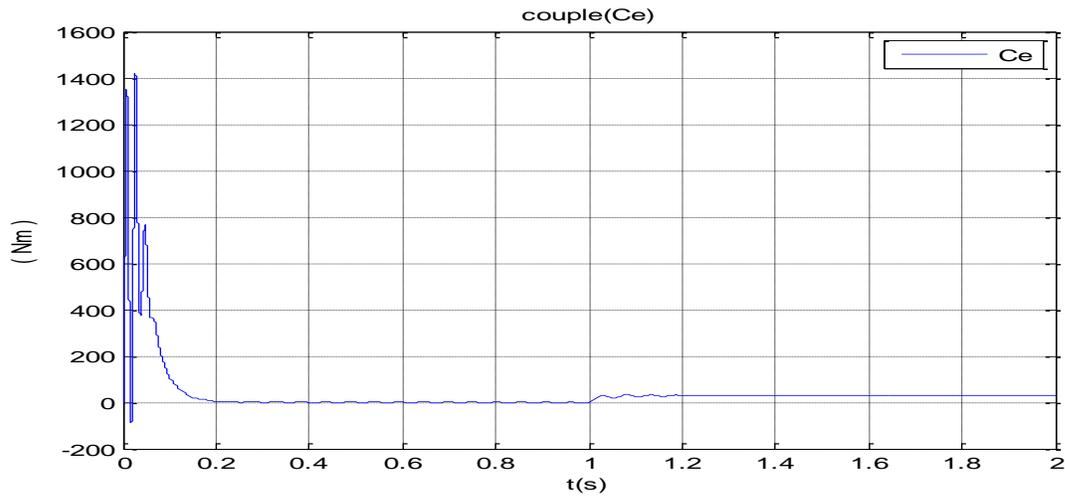
Fig. (II.27). La tension du bus continu



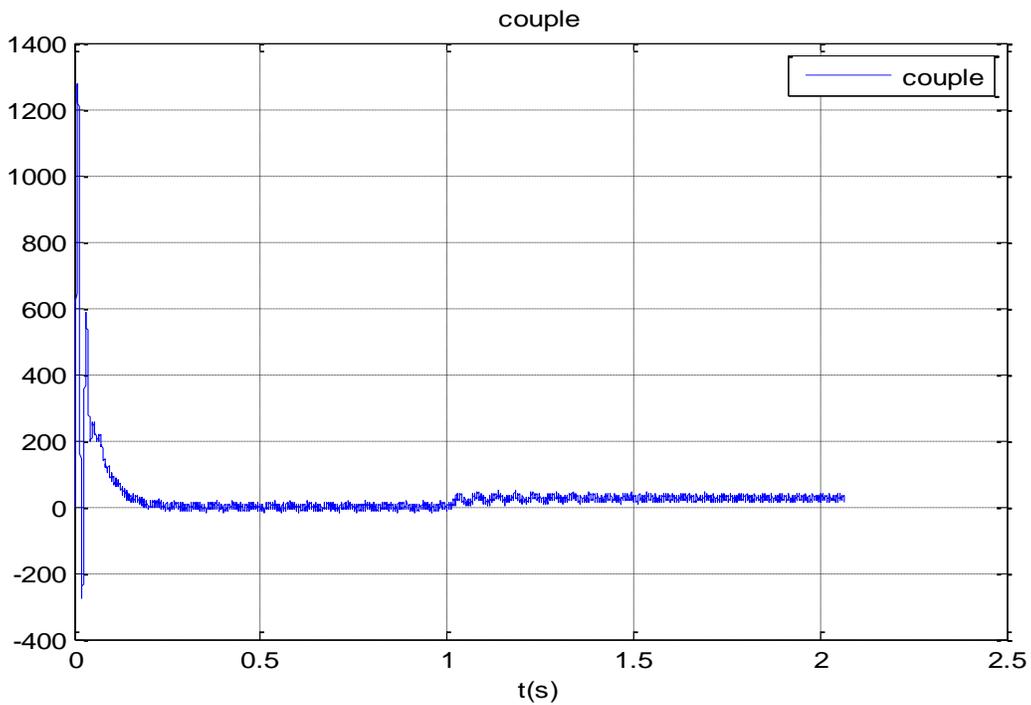
Fig(II.28) : vitesse alimentée par le réseau



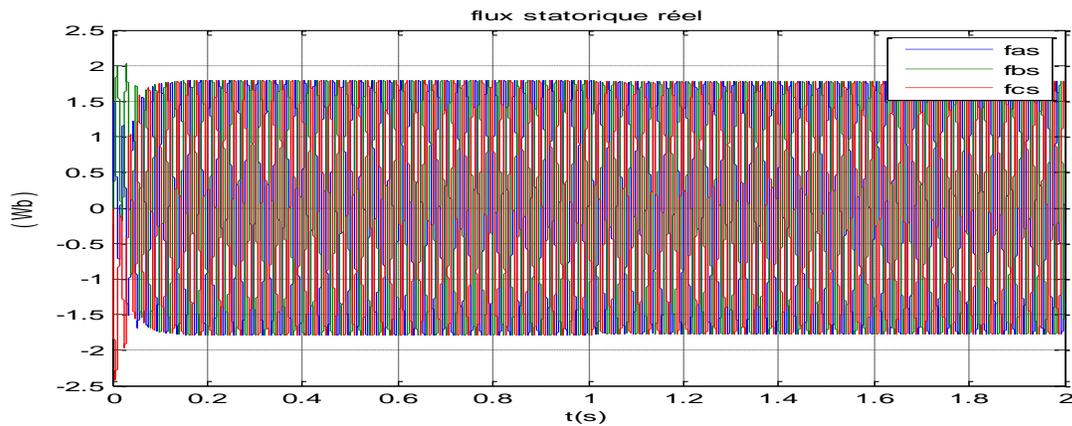
Fig(II.29) : vitesse alimentée par la cascade



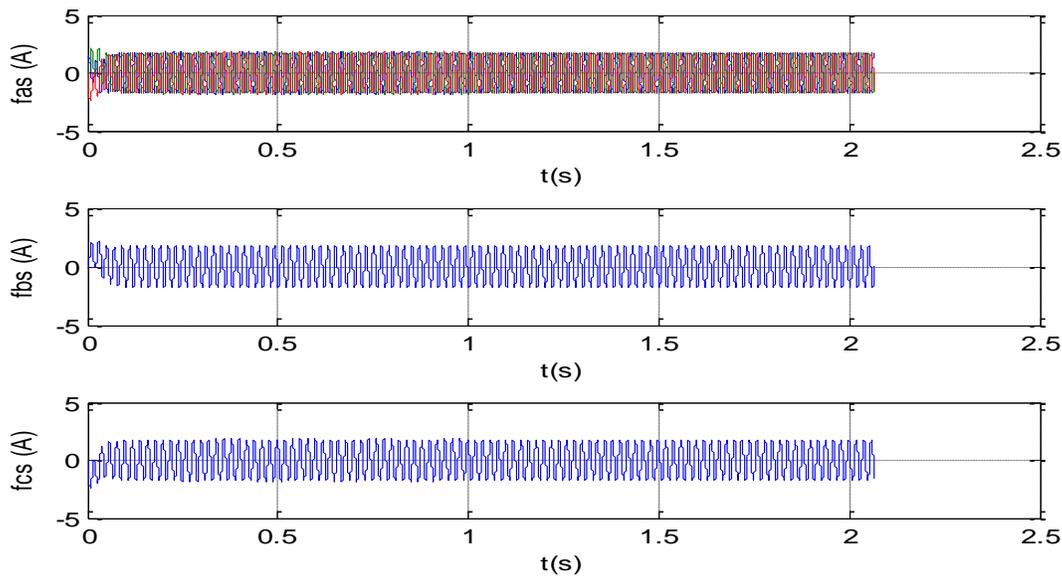
Fig(II.30) :couple électromagnétique alimenté par le réseau



Fig(II.31) :couple électromagnétique alimenté par la cascade



Fig(II.32):les flux réels statoriques par le réseau



Fig(II.33):les flux réels statoriques par la cascade

Interprétation

La montée en vitesse est quasi linéaire au début du démarrage, la vitesse atteinte est proche de 150 rad/s (vitesse de synchronisme), la machine étant à vide. Lors de l'application d'un couple de charge égale au couple nominale $C_e = C_{en} = 26 \text{ Nm}$ à $t = 1 \text{ s}$, une diminution permanente de la vitesse apparaît, ceci est dû au fait qu'il n'y pas de régulation. On remarque que le couple électromagnétique après un régime transitoire caractérisé par quelque oscillation, se stabilise à une valeur qui compense les pertes par frottement et ventilation à vide, et le couple

résistant dans le cas de l'application d'une charge. Ainsi le couple monte à *une 33N.m* alors que le couple nominal de la machine est de l'ordre de *26 N.m*. On remarque aussi le classique appel de courant lors de la mise sous tension de la machine. Les courbes des deux simulations de la machine alimentée par le réseau et par l'onduleur de tension sont presque identiques. Les oscillations au niveau du couple et de la vitesse sont dues essentiellement au convertisseur statique car la conversion continue-alternative fait apparaître des harmoniques au niveau des tensions de sortie et des courants qui influent directement sur la forme du couple et de la vitesse. Il y a contradiction entre la volonté de limiter les pertes dans l'onduleur et le désir de travailler à fréquence de modulation élevée pour réduire les effets indésirables des commutations sur les grandeurs de sortie.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait en premier la modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation. Puis, on a présenté l'étude d'une cascade basée sur deux convertisseurs MLI à deux niveaux (redresseur à deux niveaux commandés par la stratégie hystérésis et onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale) associés à la machine asynchrone à double alimentation. La modélisation et l'application du redresseur à MLI nous a permis la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la MADA. Le système conçu avec cette cascade est le plus utilisé en pratique pour les petites puissances, mais pour les fortes puissances on le trouve pas intéressant.

:

1. Introduction

Une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice, [48]. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. D'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique (MADA) est indispensable pour parvenir à cet objectif, [51]. Idéalement, une éolienne doit comporter, [49], [50], [51].

➤ Un système qui permet de la contrôler mécaniquement au niveau de la turbine, essentiellement pour limiter la puissance pour les vents forts (L'orientation des pales de l'éolienne, l'orientation de la nacelle).

➤ Un système qui permet de la contrôler électriquement au niveau du générateur associé à l'électronique de commande (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à l'asservissement de la chaîne éolienne pour un fonctionnement sain et avec défauts en analysant les régimes par la méthode d'analyse spectrale. Dans un premier temps, une étude aérodynamique de la turbine est présentée. Puis, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur L'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau.

2. Modélisation de la turbine éolienne

La turbine qui sera modélisée est à axe horizontal. Elle comporte, trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse-turbine, et elle entraîne une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

3. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes, [48],[50],[55]:

➤ La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les systèmes mécaniques.

➤ Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air (δ) est très faible et peut être ignoré. Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice.

3.1. Modèle du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle, [52]. Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien, [53]. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés, [54]. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent de grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent. Donc la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes, [52]:

$$V(t) = V_0 + V_T \quad (\text{III. 1})$$

Une composante turbulente du vent $V_T(t)$ est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent). Une composante lente V_{moy} ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

3.2. Modèle aérodynamique

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique au niveau de la turbine éolienne puis en énergie électrique via un générateur. La puissance mécanique qui peut être extraite du vent se détermine au moyen de l'expression suivante [56]:

$$P_{turbine} = C_p(\lambda, \beta) P_{vent} \quad (\text{III. 2})$$

Où $C_p(\lambda, \beta)$ est le coefficient de puissance correspondant au rendement aérodynamique de la turbine [58]. Ce coefficient diffère pour chaque éolienne et dépend de l'angle d'inclinaison des pales β et du rapport de vitesse λ .

D'après la loi établie par Betz, la puissance du vent est exprimée par:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S C_p V^3 \quad (\text{III. 3})$$

S: La surface balayée par l'éolienne.

ρ : la masse volumique de l'air (1.25 kg / m³).

$$P_{turbine} = C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{III. 4})$$

R: est le rayon de la turbine (ou longueur d'une pale) en mètre (m).

3.3. Le coefficient de vitesse réduite (tip-speed ratio) :

Le coefficient de vitesse réduite λ est un facteur spécifique des aérogénérateurs, il est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales ΩR à la vitesse instantanée du vent V d'où :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V} \tag{III.5}$$

vitesse tangentielle

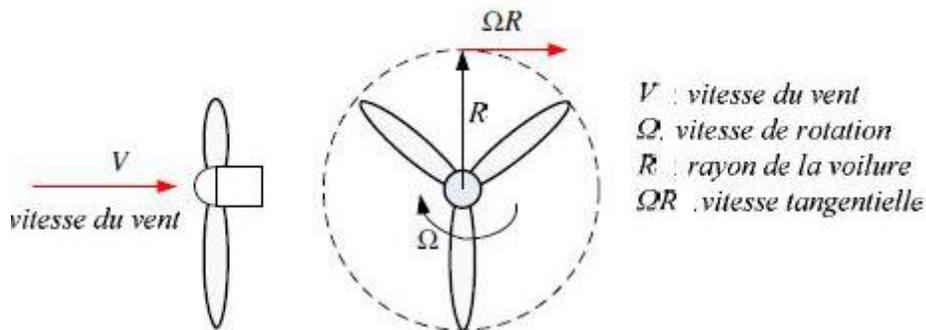


Figure (III.1). Vitesse du vent V et la vitesse tangentielle (ΩR)

Pour les éoliennes dont la puissance nominale et les caractéristiques sont semblables à celle utilisée dans notre étude le coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ est donné par la relation

$$C_p = (0,5 - 0,00167(\beta - 2)) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3(\beta - 2)}\right) - 0,00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \tag{III.6}$$

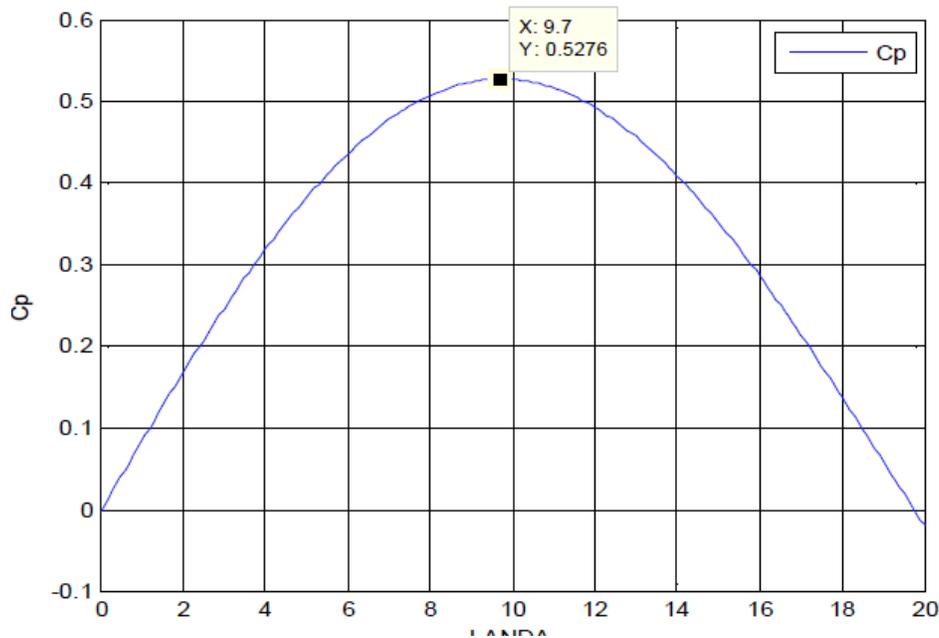


Figure (III.2). Caractéristique de la turbine éolienne.

La caractéristique de la turbine éolienne de la figure (III.2) en forme de cloche montre qu'il existe un point où l'éolienne peut être exploitée pour produire la puissance maximale. Ainsi faire fonctionner l'éolienne autour de ce point, permet de prélever la puissance maximale afin de garantir un coefficient de puissance optimale. Ce point optimal, dans notre cas, ou on a pris une turbine tripale d'un rayon de 2.4 m est donnée par :

$$\begin{aligned} C_p^{opt} &= 0.5483 \\ \lambda^{opt} &= 6.41 \end{aligned} \quad (III. 7)$$

3.4. Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables de longueur R. elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation $\Omega_{turbine}$. L'axe de la turbine est couplé à un multiplicateur de gain G dont l'axe mécanique est à son tour couplé à celui du générateur électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme une seule pale et de même le système mécanique équivalent est alors caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme le montre la Figure (III.4) et dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, vérifiée [58].

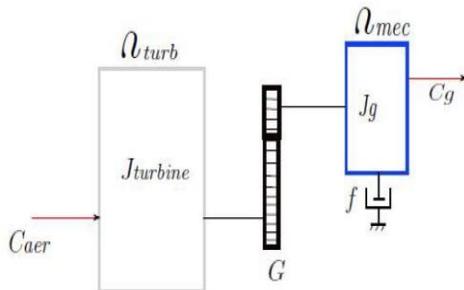


Figure (III.3). *Modèle mécanique de la turbine éolienne.*

Les notations utilisées sur cette figure correspondent à :

J_{trb} Moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales.

J_g Moment d'inertie de la MADA.

f_c coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA.

C_g couple mécanique sur l'arbre de la MADA.

Ω_{mec} Vitesse de rotation de la MADA.

3.4.1. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur lie la vitesse de la turbine Ω_{trb} à la vitesse du générateur Ω_{mec} telque :

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_{trb} \tag{III.8}$$

Où G représente le gain du multiplicateur. Aussi, le couple C_g généré sur l'arbre qui entraine la génératrice est lié au couple aérodynamique C_{aer} par:

$$C_g = C_{aer} / G \tag{III.9}$$

3.4.2. Modèle de l'arbre

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J comme étant constituée de la somme de l'inertie du générateur J_g et l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

$$J = \frac{J_{trb}}{G^2} + J_g \tag{III.10}$$

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum C_i = C_{mec} \tag{III.11}$$

Ce couple mécanique résultant C_{mec} sur l'arbre du générateur est représenté par le couple Electromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{III.12}$$

Le couple visqueux étant proportionnel à la vitesse, nous aurons :

$$C_{vis} = f \Omega_{mec} \tag{III.13}$$

Le couple visqueux étant proportionnel à la vitesse, nous aurons:

Nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique rapportée sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$C_g - C_{em} = \left(\frac{J_{trb}}{G^2} + J \right) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} \tag{III.14}$$

La figure (III.4) montre le schéma bloc du modèle de la turbine.

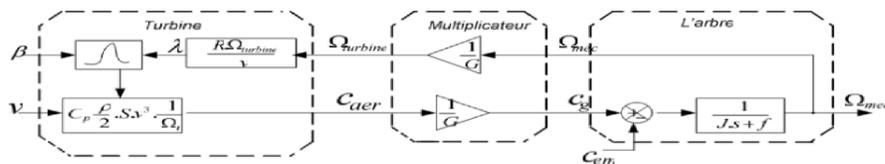


Figure (III.4). Le schéma bloc du modèle de la turbine

La turbine génère le couple aérodynamique qui est appliquée au multiplicateur.

Les entrées de la turbine sont :

- La vitesse du vent.
- L'angle d'orientation des pales.
- La vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur équation (III.8), (III.9).

Le modèle de l'arbre d'écrit la dynamique de la vitesse mécanique il a donc deux entrées:

- Le couple du multiplicateur.
- Le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- L'angle de la pale.
- Le couple électromagnétique de la génératrice.

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

3.5. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.

Il y a quatre zones de fonctionnement pour une éolienne [59]

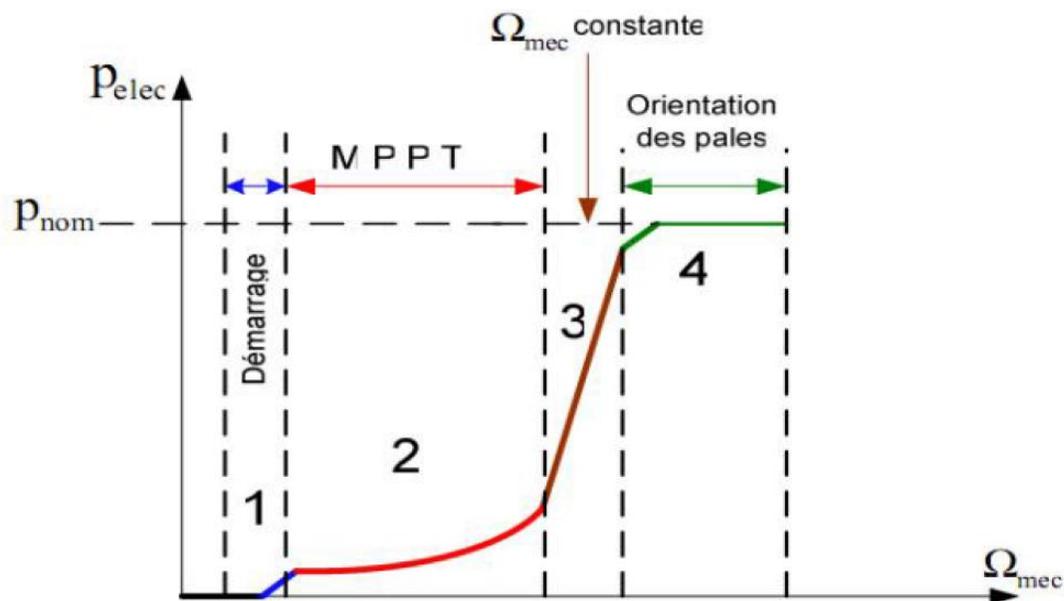


Figure (III.5). Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance

Zone1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω démarrage. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré)

Zone2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point

Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

Zone3 : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

3.5.1. Maximisation de la puissance extraite MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Le vent est une grandeur aléatoire, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance. Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égale à sa valeur de référence.

$$C_{mec} = C_{mec\ ref} \quad (III. 15)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Comme à été expliqué auparavant, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur CG et le couple électromagnétique C_{em} .

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{j} (C_G - C_{mec}) \quad (III. 16)$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence, le couple électromagnétique de référence C_{em} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} obtenu par la relation suivant :

$$C_{mec} = PI.(\Omega_{mec} - \Omega_{mec\ ref}) \quad (III. 17)$$

PI : est le régulateur de vitesse.

Ω_{ref} : est la vitesse mécanique de référence

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{turbine-ref} \quad (III. 18)$$

$$P_{meca-opt} = -\frac{1}{2} C_{Pmax} \frac{\rho \pi R^3}{G^3 \lambda^3} \Omega_{meca}^3 \quad (III. 19)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse max λ_{maxpc} (à β constant) permettant d'obtenir la valeur maximale du CP.

4. Commande vectorielle par la puissance active et réactive

4.1. Principe de la commande vectorielle

La commande par orientation de flux proposé par Blaschke, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, I_{dr} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant I_{qr} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes I_{dr} et I_{qr} sont mutuellement découplées. De nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.
- Suivant l'orientation du repère :
- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement

4.1.1. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ds} = \mathbf{R}_s \mathbf{I}_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ \mathbf{V}_{qs} = \mathbf{R}_s \mathbf{I}_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ \mathbf{V}_{dr} = \mathbf{R}_r \mathbf{I}_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ \mathbf{V}_{qr} = \mathbf{R}_r \mathbf{I}_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 20})$$

$$\text{Avec} \quad \begin{cases} C_{em} = \frac{pM}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ \frac{J}{P} \frac{d\omega}{dt} = (C_{em} - C_r - C_f) \end{cases}$$

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les flux statoriques et les courants rotoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \cdot \chi \cdot \chi \cdot \Phi_{ds} - P \cdot \chi \cdot \chi \cdot \Phi_{qs} - \chi \cdot V_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma_r} \right) v_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \cdot \chi \cdot \chi \cdot \Phi_{qs} + P \cdot \chi \cdot \chi \cdot \Phi_{ds} - \chi \cdot V_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma_r} \right) v_{qr} \\ \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{ds} + \omega_s \Phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{d\omega}{dt} = p \frac{\mu}{J} (\Phi_{qs} \cdot i_{dr} - \Phi_{ds} \cdot i_{qr}) - \frac{f}{J} \omega - \frac{1}{j} C_r \end{cases} \quad (\text{III. 21})$$

$$\text{Avec} \quad \alpha_s = \frac{R_s}{L_s} ; \quad \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right)$$

$$\gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s \cdot M^2}{L_s \cdot \sigma_r} \quad \chi = \frac{M}{L_s \cdot \sigma_r} \quad \mu = \frac{3M}{2L_s}$$

4.1.2. Choix du référentiel pour le modèle diphasé :

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine (orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul).

Nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = 0 \\ \varphi_{ds} = \varphi_s \end{cases} \begin{cases} \begin{cases} \mathbf{V}_{ds} = \mathbf{R}_s \mathbf{I}_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ \mathbf{V}_{qs} = \mathbf{R}_s \mathbf{I}_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \\ \begin{cases} \mathbf{V}_{dr} = \mathbf{R}_r \mathbf{I}_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ \mathbf{V}_{qr} = \mathbf{R}_r \mathbf{I}_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \end{cases} \quad (III. 22)$$

Dans le repère triphasé (a, b, c), la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprimé par la relation générale :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ns} = \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{i}_{ns} + \frac{d\varphi_s}{dt} \end{cases} \quad (III. 23)$$

De plus, si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ns} = \frac{d\varphi_s}{dt} \end{cases} \quad (III. 24)$$

Toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant, on peut écrire :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ds} = 0 \\ \mathbf{V}_{qs} = \mathbf{V}_s \end{cases} \quad (III. 25)$$

Le principe d'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la Figure (III.6)

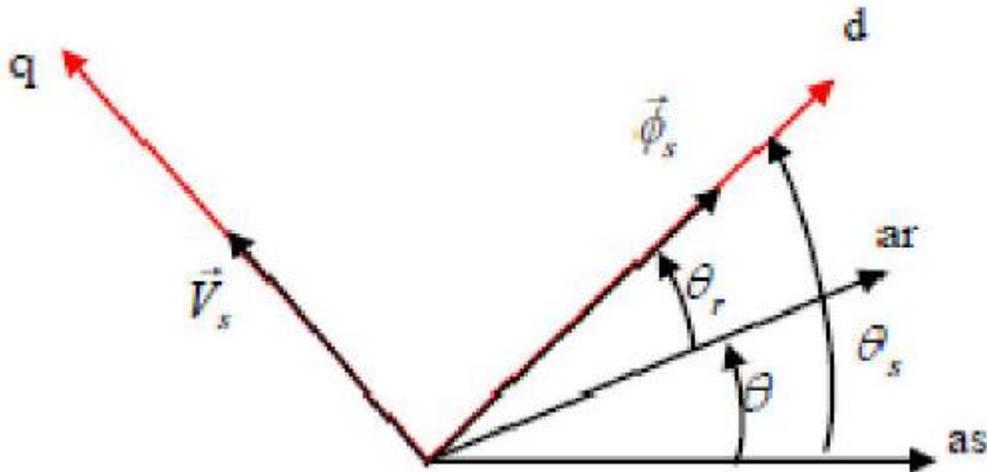


Figure (III.6). Orientation du flux statorique

Dans l'hypothèse où le flux Φ_{ds} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator). Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendante du courant rotorique D'axe q. L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_e = n_p \cdot \frac{M}{L_s} (\Phi_{ds} \cdot I_{qr}) \tag{III. 26}$$

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \tag{III. 27}$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \tag{III. 28}$$

A partir des équations (III.22), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_{ds}}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \tag{III. 29}$$

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent:

$$\begin{cases} P = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \tag{III. 30}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($v_{ds} = 0$) donne:

$$\begin{cases} \mathbf{P} = \mathbf{V}_s \cdot \mathbf{I}_{qs} \\ \mathbf{Q} = \mathbf{V}_s \cdot \mathbf{I}_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 31})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (III.23) dans l'équation (III.25), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} \mathbf{P} = -\mathbf{V}_s \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{L}_s} \mathbf{I}_{qr} \\ \mathbf{Q} = \mathbf{V}_s \frac{\varphi_s}{\mathbf{L}_s} - \mathbf{V}_s \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{L}_s} \mathbf{I}_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 32})$$

En tirant ($\Phi_s = \mathbf{V}_s / \omega_s$) de l'équation (III.21), l'expression de la puissance réactive devient :

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{\omega_s \cdot \mathbf{L}_s} \mathbf{V}_s^2 - \mathbf{V}_s \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{L}_s} \mathbf{I}_{dr} \quad (\text{III. 33})$$

Ces équations montrent qu'on a un découplage entre les commandes des puissances où la puissance active peut être commandée par la composante en quadrature du courant \mathbf{I}_{qr} . La puissance réactive peut être commandée par la composante directe du courant \mathbf{I}_{dr} . On considère les tensions rotoriques \mathbf{V}_{dr} , \mathbf{V}_{qr} comme variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques \mathbf{I}_{dr} , \mathbf{I}_{qr} comme variables d'état. Ces grandeurs sont en fonction des grandeurs de consigne et \mathbf{P}_{sref} , \mathbf{Q}_{sref}

$$\begin{cases} \mathbf{P}_s = -\mathbf{V}_s \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{L}_s} \mathbf{I}_{qr} \\ \mathbf{Q}_s = \mathbf{V}_s \frac{\varphi_s}{\mathbf{L}_s} - \mathbf{V}_s \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{L}_s} \mathbf{I}_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 34})$$

Les équations des flux

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \mathbf{L}_s \mathbf{I}_{ds} + \mathbf{M} \mathbf{I}_{dr} \\ \varphi_{qs} = \mathbf{L}_s \mathbf{I}_{qs} + \mathbf{M} \mathbf{I}_{qr} \\ \varphi_{dr} = \mathbf{L}_r \mathbf{I}_{dr} + \mathbf{M} \mathbf{I}_{ds} \\ \varphi_{qr} = \mathbf{L}_r \mathbf{I}_{qr} + \mathbf{M} \mathbf{I}_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 35})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(\mathbf{L}_r - \frac{\mathbf{M}^2}{\mathbf{L}_s} \right) \mathbf{I}_{dr} + \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{V}_s}{\omega_s \cdot \mathbf{L}_s} \\ \varphi_{qr} = \left(\mathbf{L}_r - \frac{\mathbf{M}^2}{\mathbf{L}_s} \right) \mathbf{I}_{qr} \end{cases} \quad (\text{III. 36})$$

A partir de ces équations, les expressions des tensions deviennent :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{dr} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{qr} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III. 37})$$

v_{dr}, v_{qr} : sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ; Où g correspond au glissement de la machine asynchrone. En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III. 38})$$

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$: est le terme de couplage entre les deux axes ; et $g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr}$ Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite. En examinant les équations (III.31) et (III.30), on peut établir le schéma bloc de la Figure (III.13) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques. On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine: La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée *méthode directe* car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

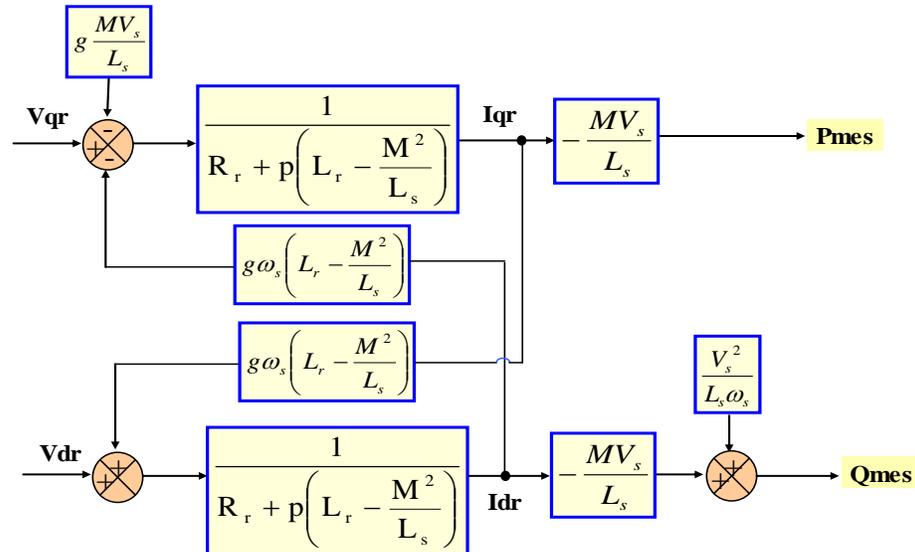


Figure (III.7). Schéma bloc de la MADA.

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques.

4.2. Commande directe

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précédent. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension v_{qr} et d'autre part la puissance réactive et la tension v_{dr} .

4.3. Mise en place de la régulation

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la Figure (IV.7) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{V_s \cdot M}{L_s}$.

Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à une machine de forte puissance et efficace, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas de régulateur entre les courants rotoriques et les puissances. Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en

compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure (III.7)[60].

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la Figure (III.8).

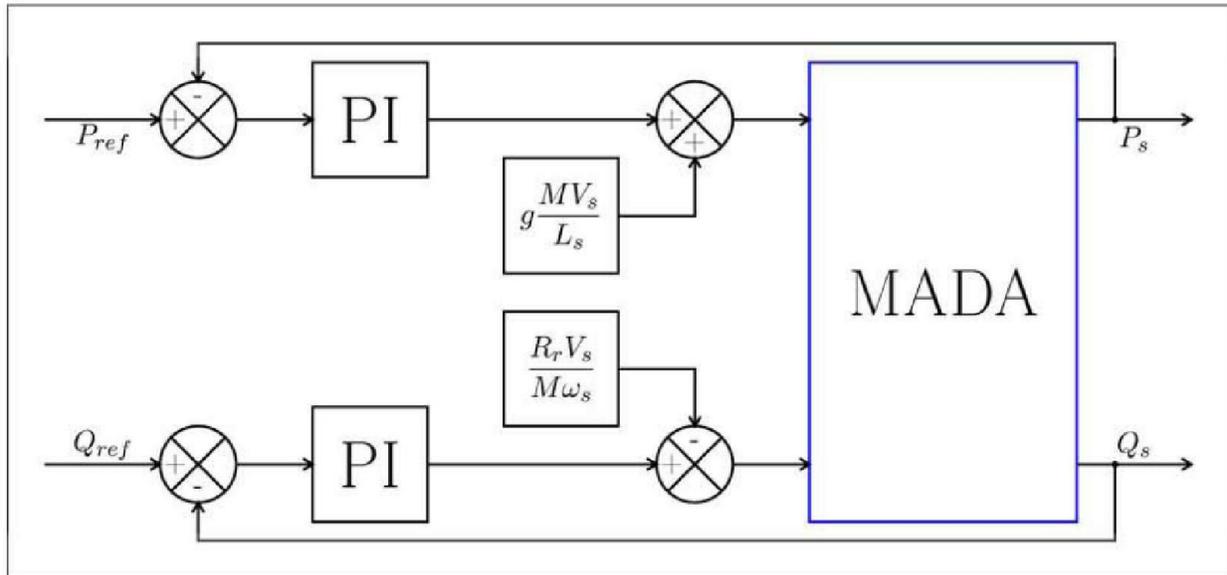


Figure (III.8). Schéma bloc de la commande directe.

4.3.1. Synthèse du régulateur PI

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [61]. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien. La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

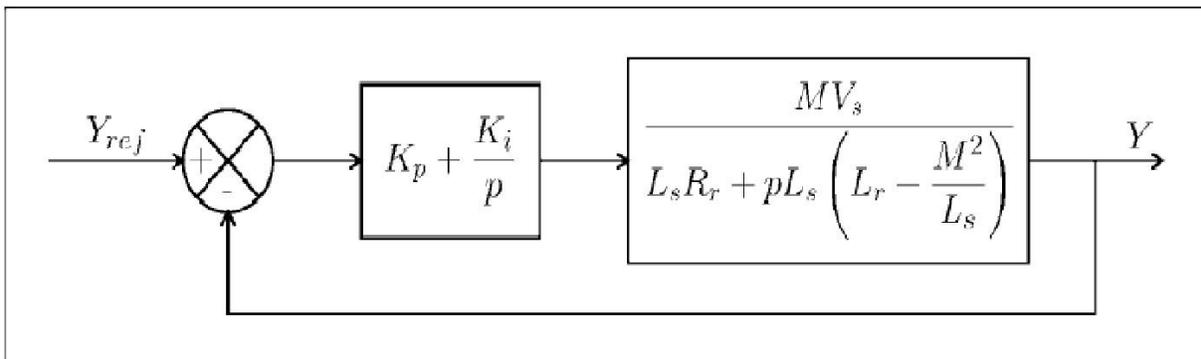


Figure (III.9): Système régulé par un PI

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{M.V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s.R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (\text{III. 39})$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s.R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (\text{III.40})$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante. Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{M.V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (\text{III.41})$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r \cdot p} \quad \text{Avec } \tau_r = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{M.V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (\text{III. 42})$$

Avec τ_r le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes. S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M.V_s} \Rightarrow k_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s.R_r}{M.V_s} \quad (\text{III. 43})$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse de régulateur PI. La figure (III.10) représente la structure globale d'une chaîne de conversion d'énergie

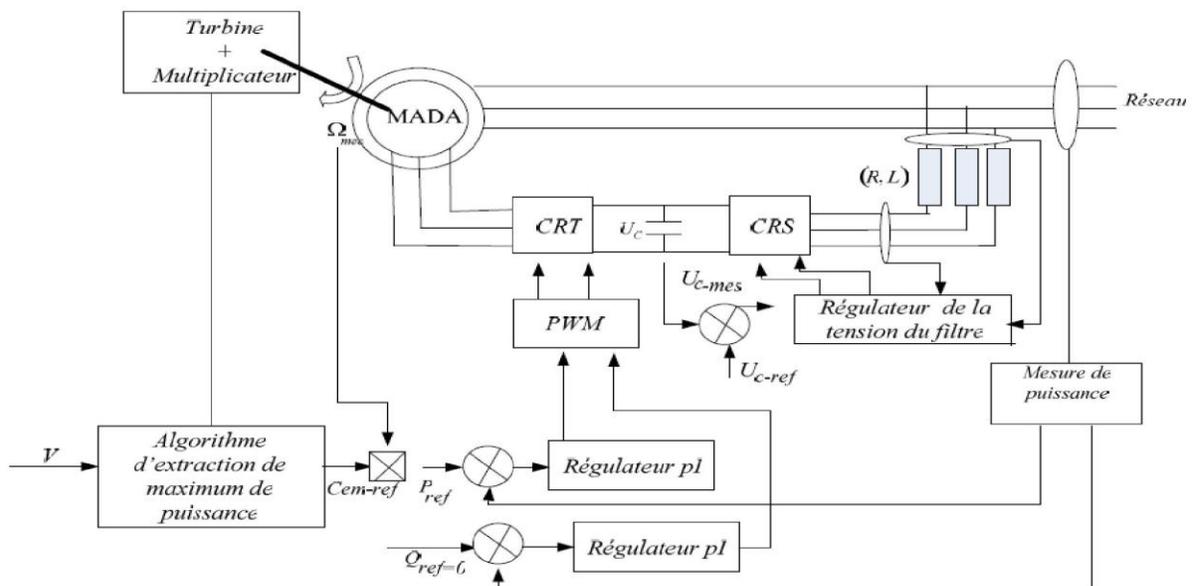


Figure (III.10) : Schéma structurel du système éolien global

5. Résultats de simulation

Le teste de performance de la chaîne éolienne est fait en considérant un vent de vitesse variable. La machine étant raccordée à un réseau de grande puissance d'une tension nominale efficace de 220 V et d'une fréquence de 50 Hz. Les résultats de simulation de toute la chaîne éolienne sont représentés sur les figures ci-dessous.

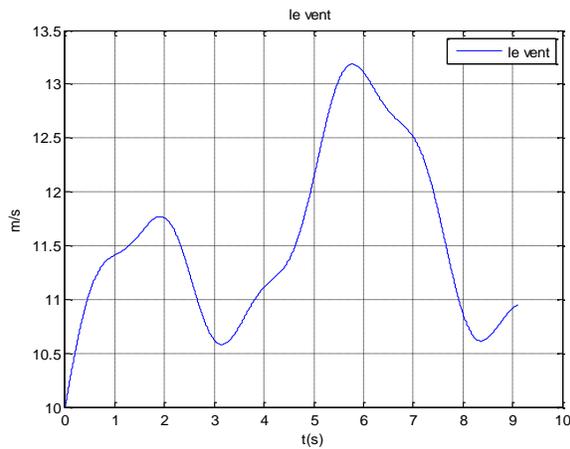


Fig. (III.11). Le profil du vent

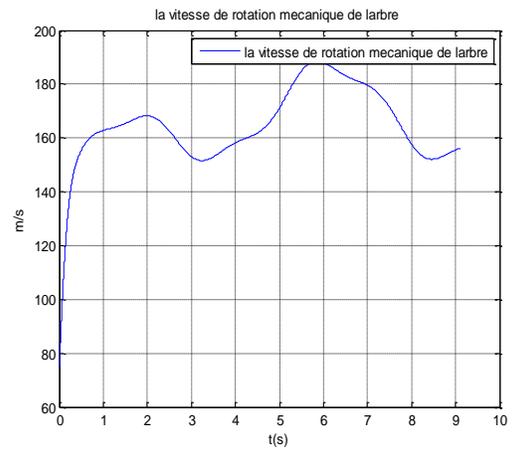
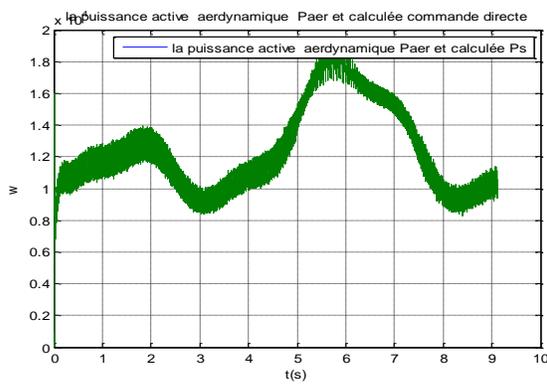
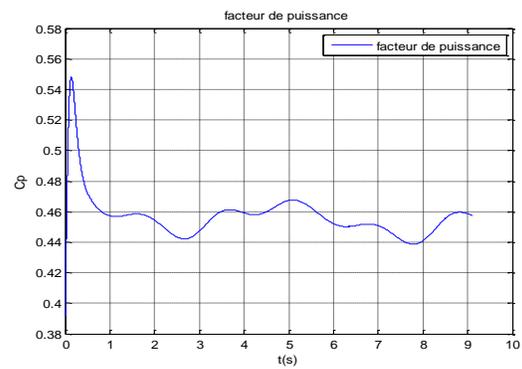


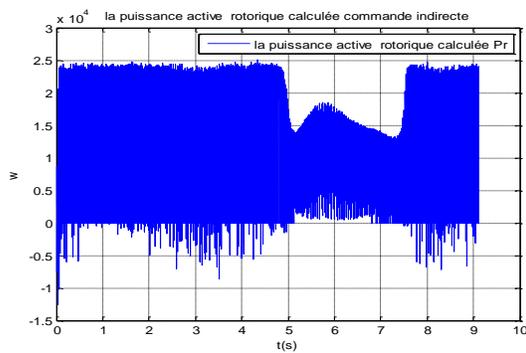
Fig. (III.12) La vitesse de rotation



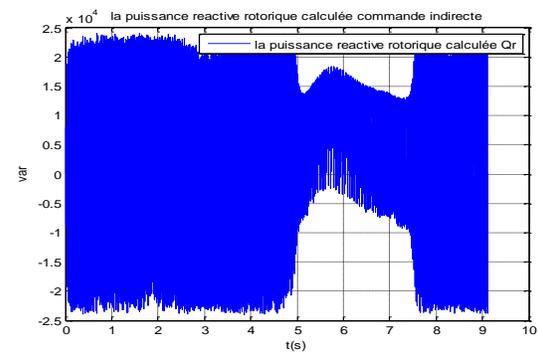
Fig(III.13) Puissance aérodynamique et active statorique calculée



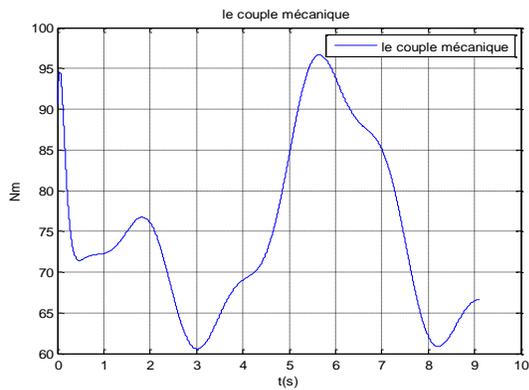
Fig(III.14) facteur de puissance



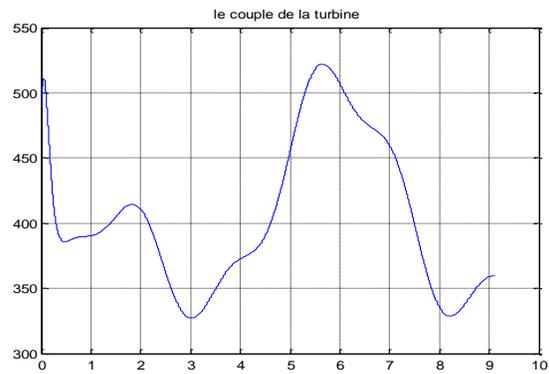
Fig(III.15):puissance active rotorique en commande Commande indirecte



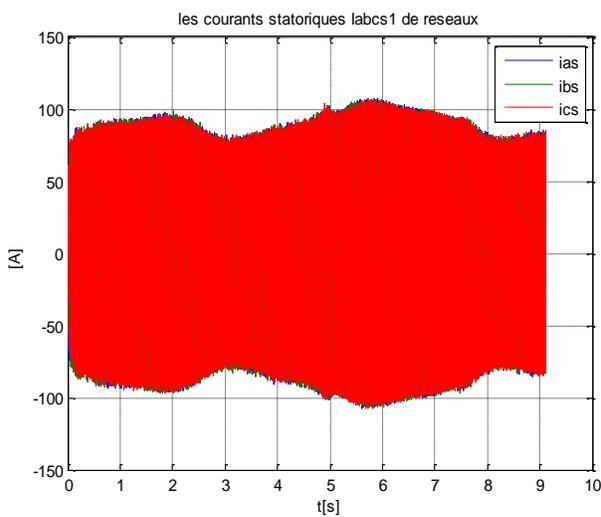
Fig(III.16) :puissance réactive rotorique en commande indirecte



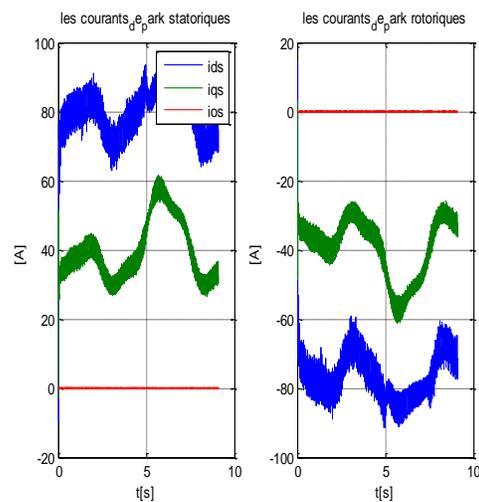
Fig(III.17):couple mécanique



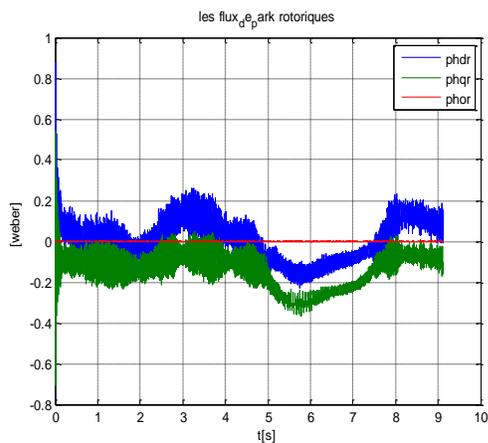
Fig(III.18):couple de la turbine



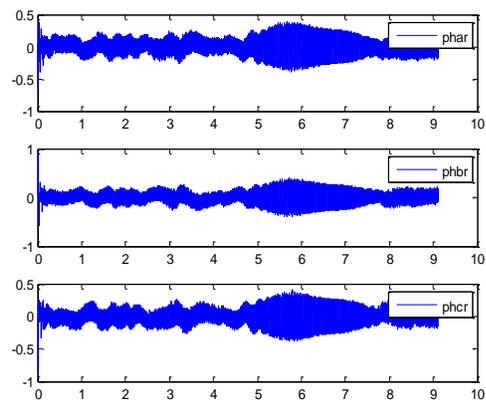
Fig(III.19) :courants real statoriques



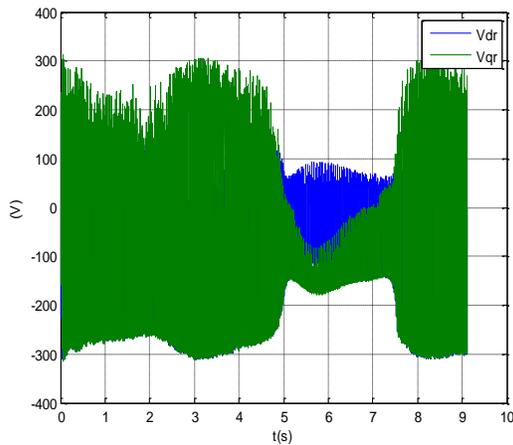
Fig(III.20) :courants statoriques et rotoriques de park



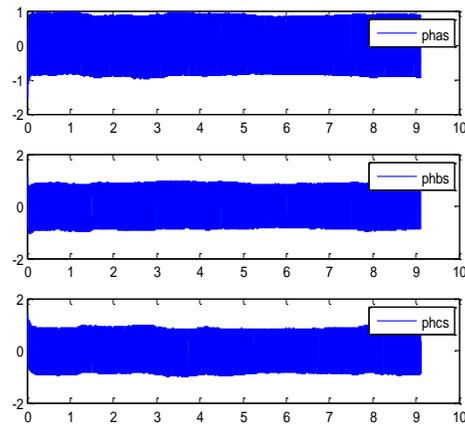
Fig(III.21) :les flux de park rotoriques



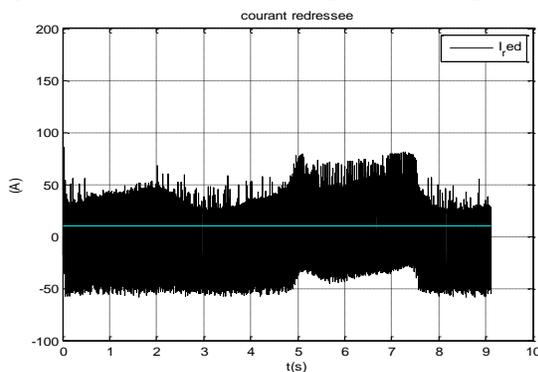
Fig(III.22) :les flux real rotoriques



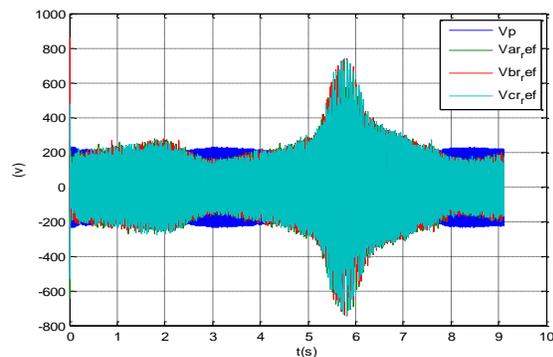
Fig(III.23) : les tensions de park rotoriques



Fig(III.24) : les flux real statoriques



Fig(III.25) : courant redressé



Fig(III.26) : les tensions rotoriques de reference et la porteuse

Interprétation

La Figure (III.11) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne sa valeur moyenne est autour de (10m/s).

Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique calculée figure (III.13) est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice figure (III.12), et cette dernière est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite. Le couple électromagnétique de la génératrice varie selon celui de la turbine qui est l'image de la vitesse du vent la Figure (III.11), Figure (III.20) présente la variation de l'amplitude des courant statoriques et rotoriques en fonction de la vitesse de rotation, il est de même pour les flux rotoriques de park Fig(III.23) prenant la forme de la variation de la vitesse de la génératrice. Finalement on déduit que toutes les grandeurs électromécaniques prennent une forme du profil du vent.

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé la turbine en premier temps et on a développé un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en parlant de la

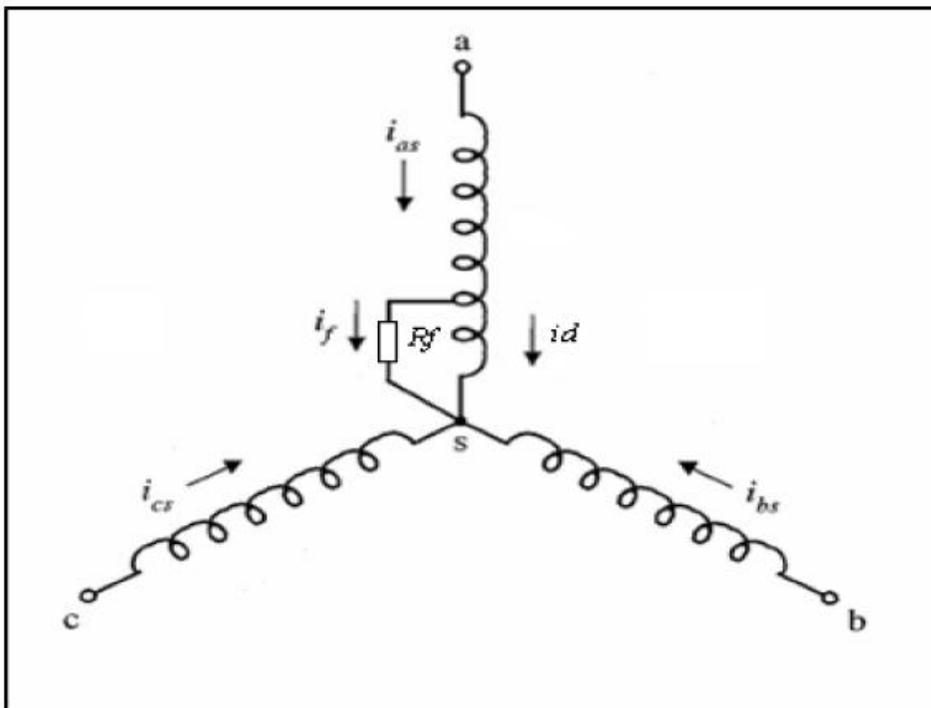
commande vectorielle directe de la MADA. Ensuite, On a présenté les résultats de simulation d'une chaîne de conversion d'énergie pour MADA saine, on a trouvé que les grandeurs électromagnétiques dépendent de la vitesse de la turbine. La commande indirecte des puissances statoriques et rotoriques est très appréciable suite à leur réglage en boucle interne et externe. celle-ci montre la fiabilité de la MADA génératrice à la chaîne et la performance de l'énergie éolienne.

Modélisation de MADA en court-circuit

1. Modélisation de la MADA avec défaut statoriques-rotoriques « court-circuit entre spires »

1.1. Modélisation de la MADA avec défaut statoriques « court-circuit entre spires »

Le type de court-circuit statorique le plus fréquent et qu'on va traiter dans cette partie concerne le court-circuit entre spires de même phase. Pour modéliser ce défaut, on va supposer qu'un nombre de spires « n » parmi celles la phase « a » est court-circuité. Cette section de spires court-circuitées est définie par le rapport « cc » entre le nombre de spires court-circuitées et le nombre totale des spires de la phase « a », qu'on introduit dans le modèle mathématique régissant le fonctionnement de la machine. La figure (III.3) présente les 3 enroulements statorique avec court circuit. Par conséquent l'inductance propre et la résistance de la phase en défaut change ainsi que l'inductance mutuelle entre cette phase et tous les autres enroulements de la machine.



Fig(IV.1): Représentations des trois enroulements statoriques d'une MADA avec court-circuit entre spires dans la phase 'a'.

Le défaut de court-circuit dans l'enroulement statorique entraîne à une circulation d'un courant élevé dans les spires court-circuitées. Ce courant de défaut peut influencer sur les courants des autres phases et produit un court-circuit phase-terre et phase-phase, et par la suite conduit à l'endommagement de la machine. Donc, la détection de ces défauts est indispensable pour éviter

CHAPITRE IV : Diagnostic de la MADA en présence des défauts de CC

un fonctionnement à des conditions dangereuses et réduire le temps d'arrêt. La modélisation de la machine avec défaut de court-circuit entre spires est la première étape de développement des techniques de détection de ce défaut. Elle présente un compromis entre la complexité et la fiabilité des résultats. La modélisation de la MADA avec défaut consiste à introduire une résistance «Rf » en parallèle avec les spires court-circuitées dans la phase infectée (Figure. III.3). Une tension sera induite dans cette maille de court-circuit, cette tension induite fait circuler un courant dans les spires court-circuitées appelé courant de défaut ; ce dernier a une relation de proportionnalité avec la résistance de défaut et la tension induite. La résistance «Rf » élevée correspond au cas de début de la détérioration de l'isolation [26] [27]. Il convient de rappeler ici que cette méthode d'analyse est uniquement destinée à des situations où la dégradation de l'isolation se passe par une longue période de temps. La nouvelle forme des équations des tensions statoriques se réécrit alors comme suit:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (IV.1)$$

Avec

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \\ V_{ds} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{ds} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \\ \Phi_{ds} \end{bmatrix};$$

La matrice des résistances statoriques se réécrit comme suit:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} (1-cc).R_s & 0 & 0 & cc.R_s \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & cc.R_s \end{bmatrix} \quad (IV.2)$$

Cependant, nous gardons la matrice des tensions rotoriques inchangée. Si nous désignons par « cc » le fraction du nombre de spires court-circuitées de la phase "a", alors nous avons une portion saine de fraction (1-cc) de spires et nous supposons les phases « b » et « c » saines. Nous aurons la nouvelle matrice des inductances statoriques suivantes

$$\left[L_{ss} \right] = L_{fs} \text{diag}[(1-cc)11cc] + M_s \begin{bmatrix} (1-cc)^2 & -\frac{1-cc}{2} & -\frac{1-cc}{2} & cc(1-cc) \\ -\frac{1-cc}{2} & 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{cc}{2} \\ -\frac{1-cc}{2} & -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{cc}{2} \\ cc(1-cc) & -\frac{cc}{2} & -\frac{cc}{2} & cc^2 \end{bmatrix} \quad (IV.3)$$

Par conséquent, la matrice des inductances mutuelles dans (II) devient:

$$\left[M_{sr} \right] = M \begin{bmatrix} (1-cc).\cos\theta_r & (1-cc).\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & (1-cc).\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \\ cc.\cos\theta_r & cc.\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & cc.\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (IV.4)$$

La matrice des inductances rotoriques demeure égale à celle du cas non défaillant :

$$\left[L_{rr} \right] = \begin{bmatrix} M_r + L_{fr} & -\frac{M_r}{2} & -\frac{M_r}{2} \\ -\frac{M_r}{2} & M_r + L_{fr} & -\frac{M_r}{2} \\ -\frac{M_r}{2} & -\frac{M_r}{2} & M_r + L_{fr} \end{bmatrix}$$

L'ordre du système des équations de la machine défaillant à résoudre est augmenté d'une équation par rapport à celui de la machine saine.

1.2. Modélisation de la MADA avec défaut rotorique « court-circuit entre spires »

La modélisation de la MADA avec défaut de court-circuit entre spires rotoriques est similaire au cas précédent « court-circuit statorique » en suivant les mêmes étapes. la nouvelle forme des équations des tensions rotoriques se réécrit alors comme suit[28] :

$$\left[V_r \right] = \left[R_r \right] \left[I_r \right] + \frac{d\Phi_r}{dt}$$

Avec

(IV.5)

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \\ V_{dr} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \\ I_{dr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \\ \Phi_{dr} \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances rotoriques se réécrit comme suit:

$$[R_r] = \begin{bmatrix} (1-cc).R_r & 0 & 0 & cc.R_r \\ 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & cc.R_r \end{bmatrix} \quad (IV.6)$$

Cependant, nous gardons la matrice des tensions statoriques inchangée.

Si nous désignons par « cc » la fraction du nombre de spires court-circuitées de la phase "a" rotorique, alors nous obtenons la nouvelle matrice des inductances rotoriques suivante :

$$[L_{rr}] = L_{fr} \text{diag}[(1-cc)1cc] + M_r \begin{bmatrix} (1-cc)^2 & -\frac{1-cc}{2} & -\frac{1-cc}{2} & cc(1-cc) \\ -\frac{1-cc}{2} & 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{cc}{2} \\ -\frac{1-cc}{2} & -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{cc}{2} \\ cc(1-cc) & -\frac{cc}{2} & -\frac{cc}{2} & cc^2 \end{bmatrix} \quad (IV.7)$$

Par conséquent, la matrice des inductances mutuelles (III.6) devient :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t = M \begin{bmatrix} (1-cc).\cos\theta_r & (1-cc).\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & (1-cc).\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \\ cc.\cos\theta_r & cc.\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & cc.\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (IV.8)$$

La matrice des inductances statoriques reste la même que dans le cas non défaillant.

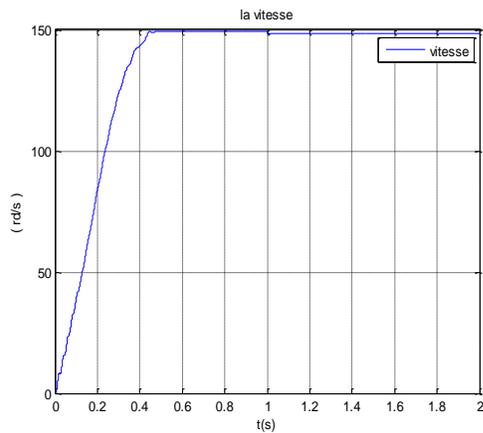
2. Resultas de simulation :

2.1. similation de la MADA en modèle simple et réel(abc) sans et avec défaut de CC.

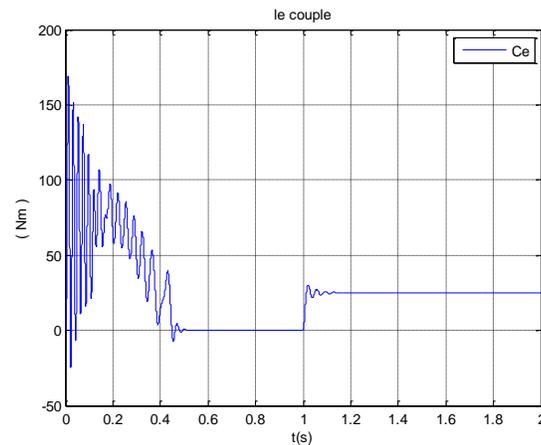
CHAPITRE IV : Diagnostic de la MADA en présence des défauts de CC

La simulation numérique est bien connue aujourd'hui dans le domaine des machines électriques. Elle nous permet de modéliser, d'analyser et de simuler les systèmes avec beaucoup de précision. De nos jours il existe toute une panoplie de logiciels pour les machines électriques. Afin de simuler la MADA en court-circuit, nous avons opté pour le logiciel MATLAB. Les données de la machine utilisée en simulation sont données en annexe. Nous avons simulé la MADA alimentée par un réseau en modèle réel (abc) sans et avec court-circuit à $t = 1\text{s}$, $cc = 0.1$

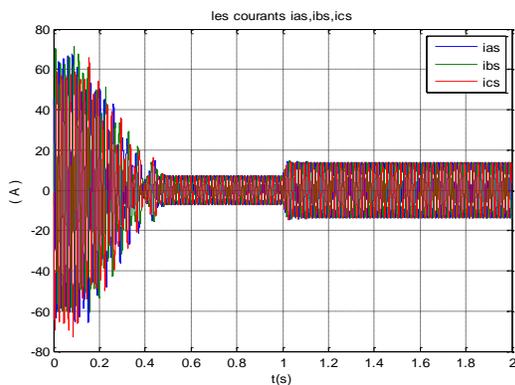
- Démarrage à vide et en appliquant un couple résistant au égal au couple nominal $C_r = C_{en} = 26\text{N.m}$ à $t = 1\text{s}$



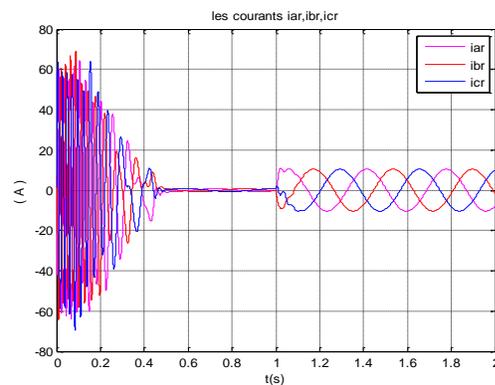
Fig(IV.2) : vitesse mécanique de la machine alimentée en real mode(abc)



Fig(IV.3) : couple électromagnétique de la machine en real mode(abc)

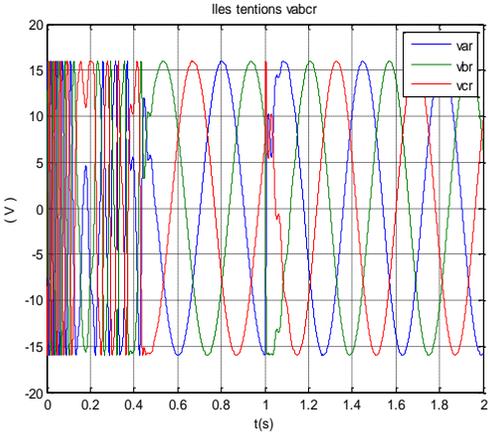


Fig(IV.4) : courants statoriques réels

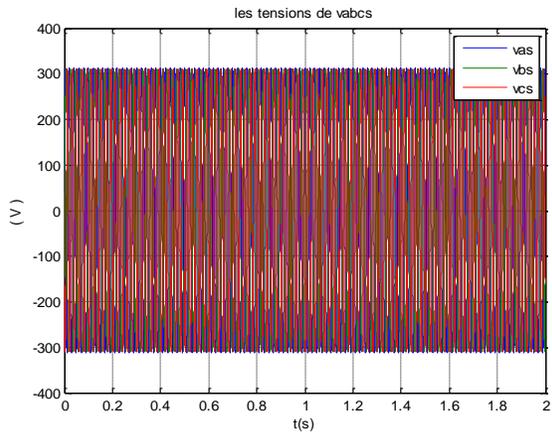


Fig(IV.5) : les courants réels rotoriques

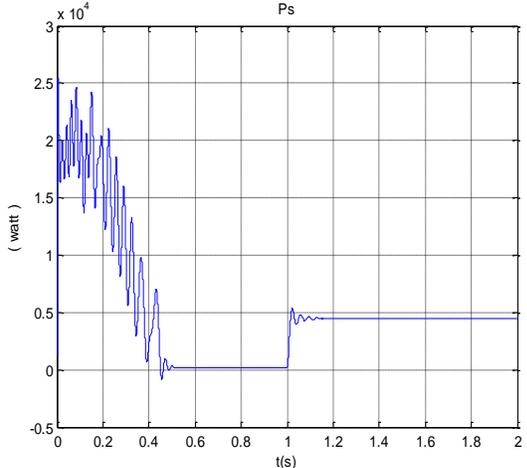
CHAPITRE IV : Diagnostic de la MADA en présence des défauts de CC



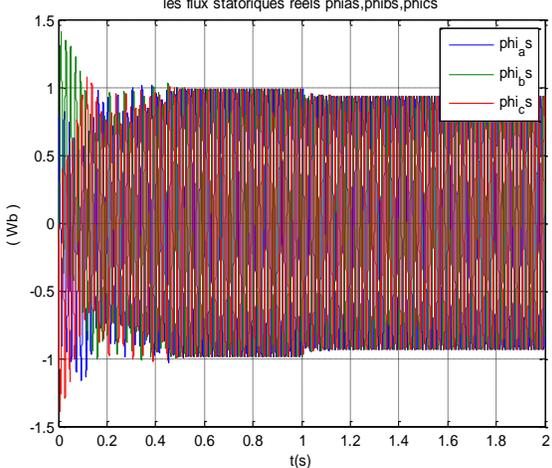
Fig(IV.6):les tensions real rotoriques en real mode(abc)



Fig(IV.7) :les tensions real statoriques



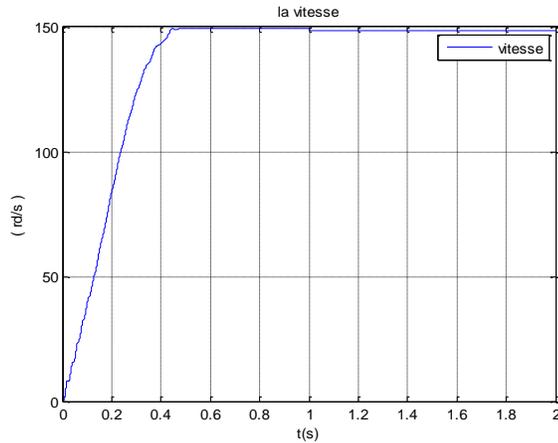
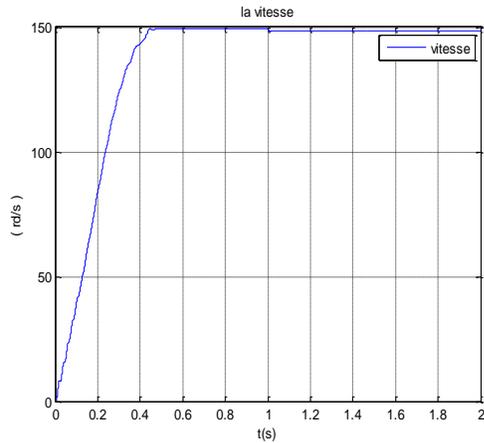
Fig(IV.7) :puissance active statotoriques



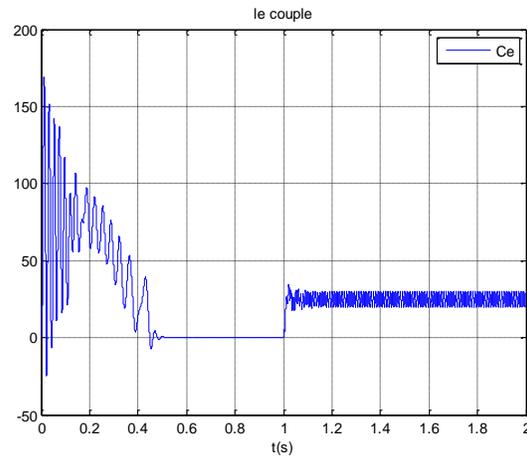
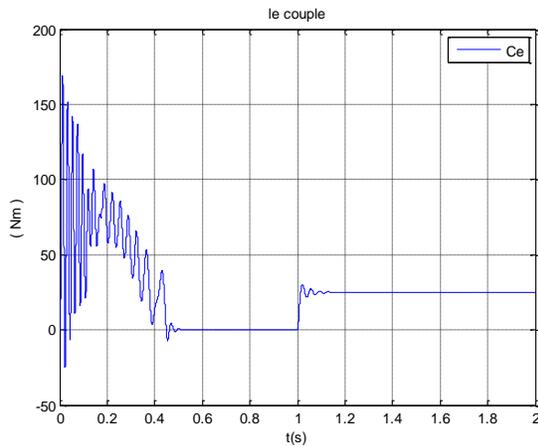
Fig(IV.9):flux real statoriques

2.2.resultats de simulation avec défauts de court-circuit CC=0.1 à t=1sec et un couple resistant égal au nominal Cr=Cen=26Nm

CHAPITRE IV : Diagnostic de la MADA en présence des défauts de CC

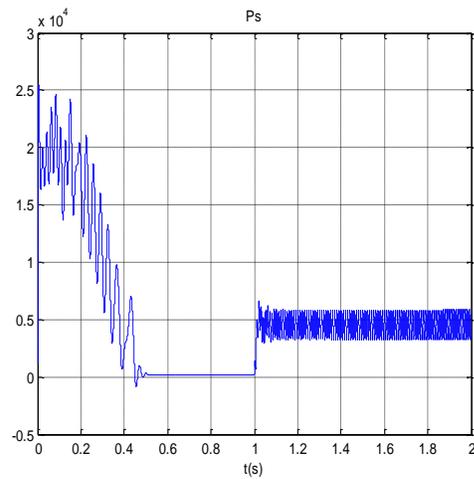
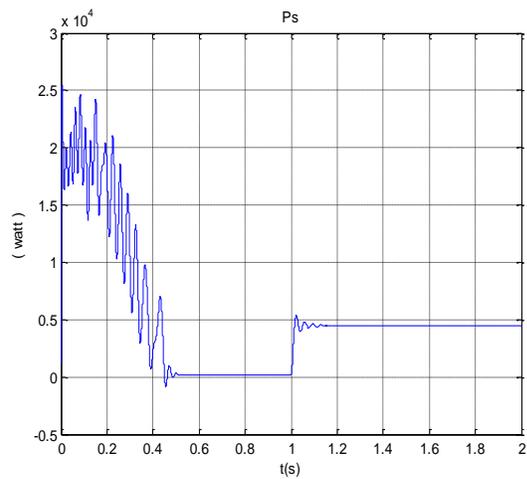


Fig(IV.10):vitesse mécanique par le réseau réel Fig(IV.11):vitesse mécanique en présence du CC

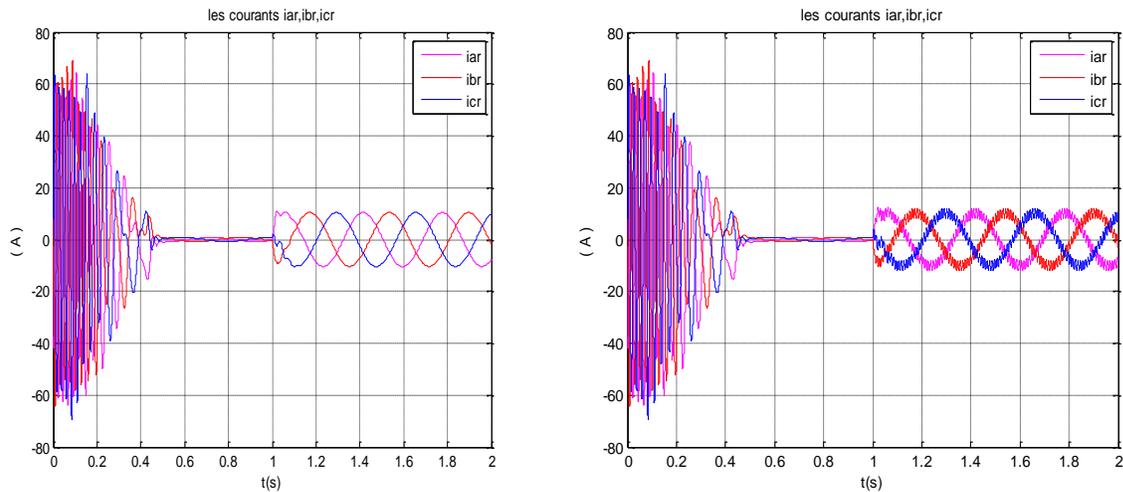


Fig(IV.12) :couple électromagnétique Fig(IV.13) :couple électromagnétique en présence du CC

pour MADA real sans CC pour MADA real sans CC



Fig(IV.14) :puissance active pour MADA sans CC Fig(IV.15) :PCE active statorique en CC



Fig(16 :IV) :courants real rotoriques Fig(IV :18) :courants rotoriques pour MADA en CC pour MADA sans CC

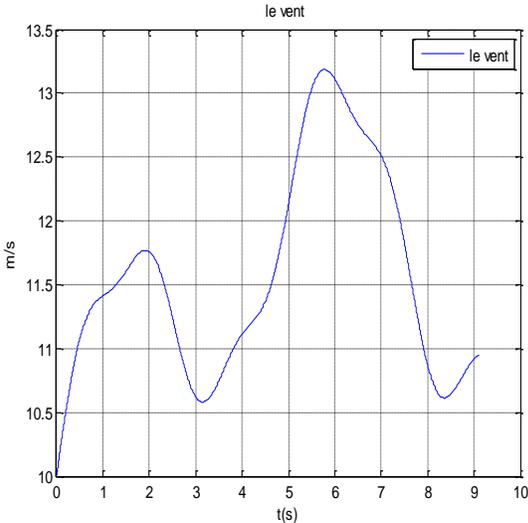
Interprétation :

Pour MADA réelle mode (abc) connectée à un réseau de tension nominale 220V/50Hz, au démarrage à vide et on applique un couple résistant égal au couple nominal $C_r = C_{en}$ et un court-circuit de rapport $CC=0.1$ à $t=1\text{sec}$, on remarque que la vitesse de la machine en état de couplage ne laisse aucun aperçu sur ce défaut, ce dernier affecte bien clair les autres grandeurs électromagnétiques.

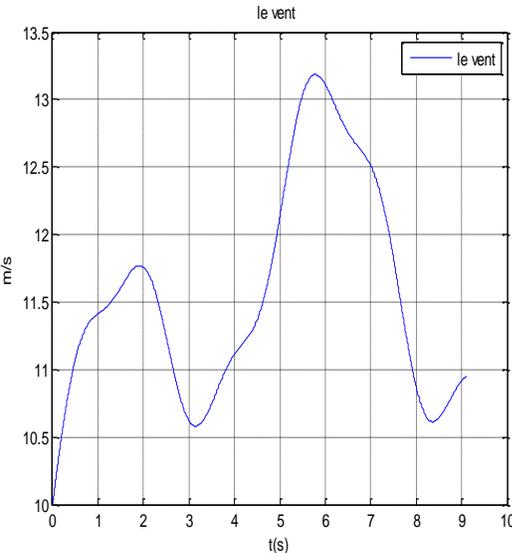
2.3. resultats de simulation de DFIG en présence des défauts de court-circuit et connectée à une chaîne éolienne.

En jumelant tout le travail (MADA court-circuitée, turbine, convertisseurs), La machine étant raccordée à un réseau de tension nominale efficace de 220 V et d'une fréquence de 50 Hz, un rapport de court-circuit $CC=0.1$. Les résultats de simulation de toute la chaîne éolienne sont représentés sur les figures ci-dessous

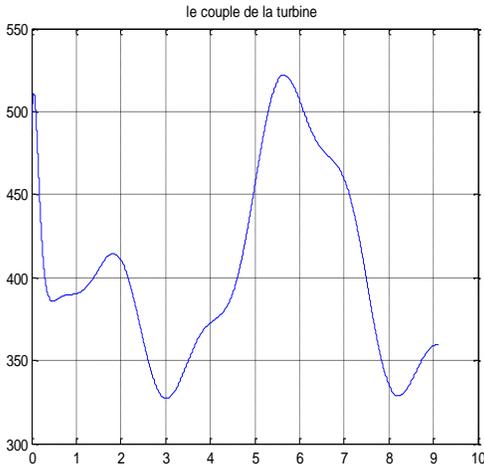
CHAPITRE IV : Diagnostic de la MADA en présence des défauts de CC



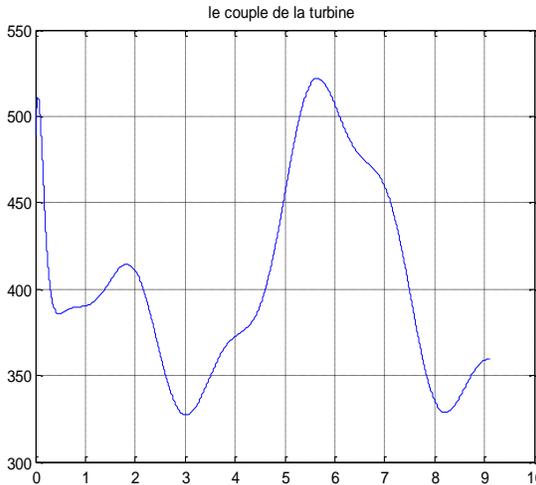
Fig(IV.19) :profil du vent sans CC



Fig(IV.20) :profil du vent avec CC

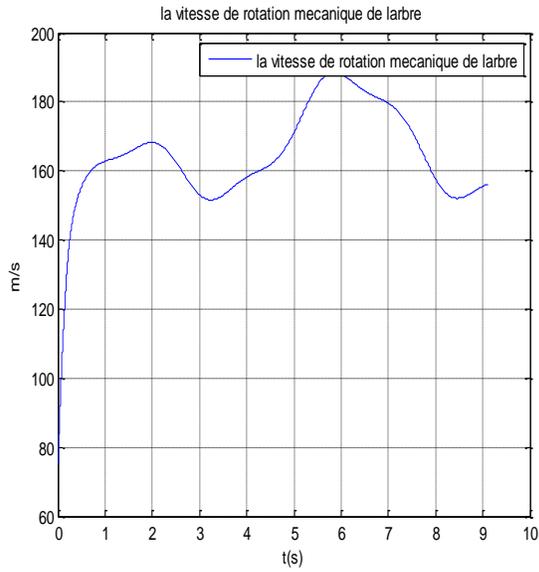


Fig(IV.21) :couple de la turbine sans CC

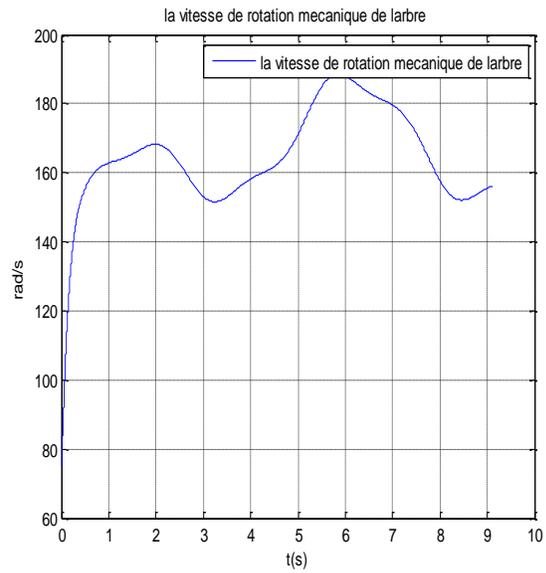


Fig(IV.22) :couple de la turbine sans CC

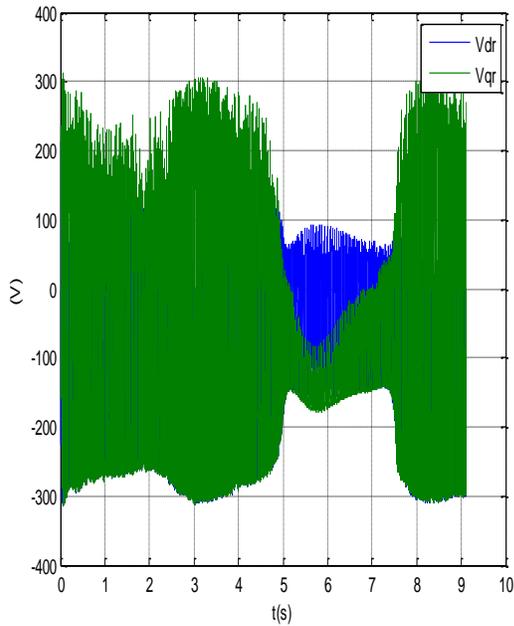
CHAPITRE IV : Diagnostic de la MADA en présence des défauts de CC



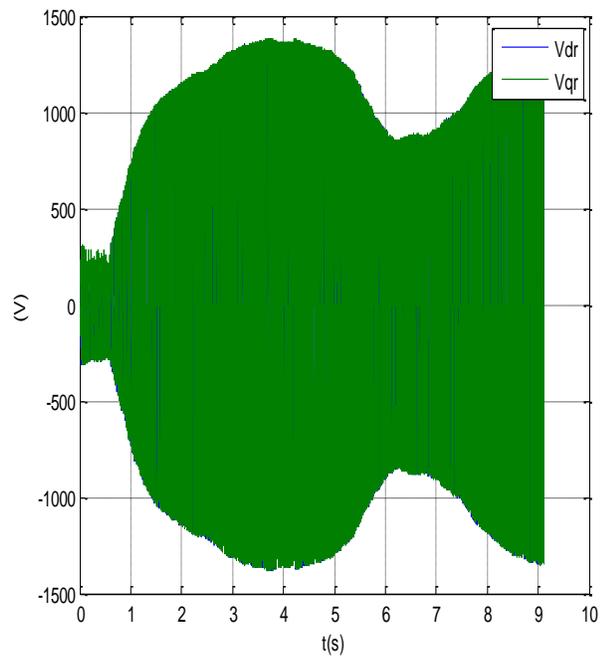
Fig(IV.23) :vitesse mecanique sans CC



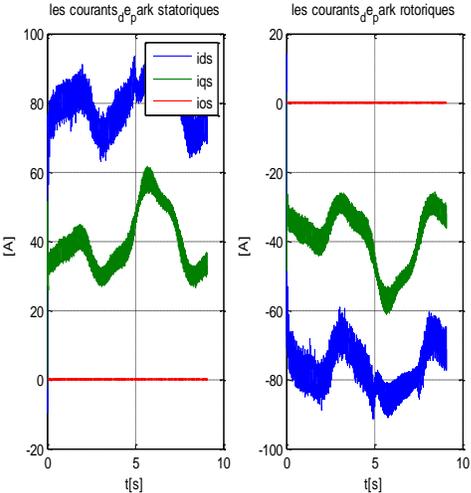
Fig(IV.24) :vitesse mecanique avec CC



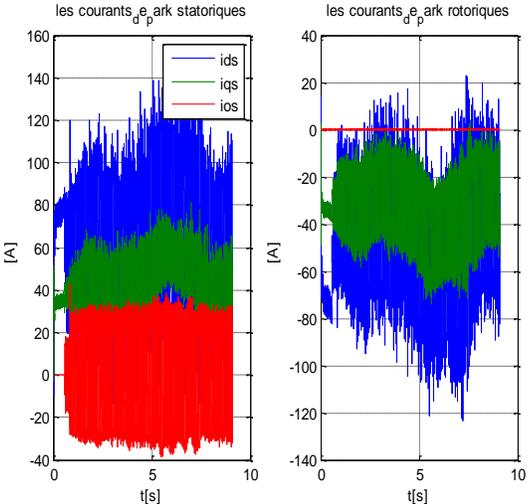
Fig(IV.25) :tensions rotoriques sans CC



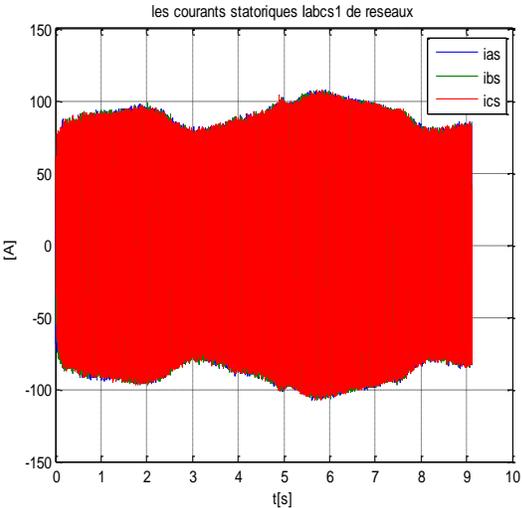
Fig(IV.26) :tensions rotoriques avec CC



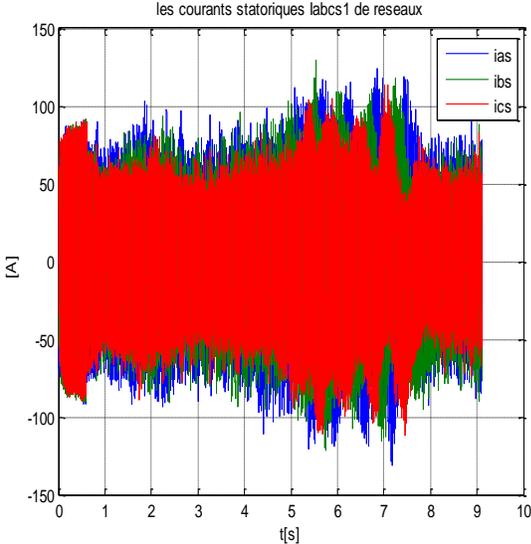
Fig(IV.27) :courants de park sans CC



Fig(IV.28) :courants de park avec CC



Fig(IV.29) :courants real statoriques sans CC



Fig(IV.30) :courants real statoriques sans CC

Interprétation

L'analyse des figures précédentes montre que l'influence du défaut de court-circuit sur les performances de la chaîne est inaperçue à travers la vitesse mécanique, vent et les deux couples, ce défaut a bien d'influence sur les courants et tensions statoriques et rotoriques

3.conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé en premier lieu le défaut de la MADA à l'aide des éléments magnétiques et électriques. Ensuite, On a présenté les résultats de simulation pour MADA en modèle real(abc) sans et avec défaut de court-circuit. On a trouvé que le défaut influe sur la machine en état de couplage en créant d'amplitudes pulsatoires sur les courants, les tensions, puissance active statorique et le couple. Au deuxième lieu après la simulation de l'ensemble, On a trouvé que le défaut de court-circuit influe sur les courants statoriques et rotoriques qui influent sur les puissances actives statoriques. les variations des grandeurs ne sont pas remarquables pour le domaine temporel.

Bibliographie

- [1] O. GERGAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau », Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, Décembre, 2002.
- [6] A. MIRECKI, « Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées `a une Eolienne de Petite Puissance », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, (2005).
- [7] J. MARTIN, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [8] F. PITIERS, « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003.
- [9] E. HAU, « Wind turbines », 2nd Ed Springer, 2006.
- [10] N. MEKKAOUI, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini- Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, (2004)
- [11] M. BARAKATI, « Modeling and Controller Design of a Wind Energy Conversion System Including a Matrix Converter », thèse de doctorat Université de Waterloo, Canada, (2008).
- [25] A. BOYETTE, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré Nancy I, 11 décembre, 2006.
- [13] S. TARAFT, « Etude du Stockage Inertiel d'Energie dans une Chaîne de Conversion Eolienne à Vitesse Variable Basée sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation » mémoire de magister, Université de Bejaia, Algérie, (2008).
- [14] R. MENNICHE et A. SLIMANI, « Intégration d'une chaîne éolienne au réseau », Mémoire d'Ingéniorat .U.S.T.H.B .Algérie, 2009.
- [15] H. BOUKHARI et S. GUERMACHE, « Étude d'une éolienne à vitesse variable avec génératrice asynchrone pilotée par le stator », Mémoire de Master, USTHB, 2010.
- [16] R. KEZERLI, « Alimentation et Commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multi-niveaux », Mémoire de Magister, USTHB, 2009.
- [17] MICHEL WAUTELET, « Sciences technologies et société », livre, 2001
- [18] A. HAL-BAHRANI, « Analysis of Self-excited induction generators under unbalanced conditions », Electric Machines and power systems, 24, 1996, pp.117-129.
- [19] B. HOPFENSBERGER ET D. J. ATKINSON, « Doubly-fed a.c machines classification and comparison », European conf, Power Electronics and Applications (EPE), pp.1-17, Graz, 2001.
- [20] DENDOUGA ABDELHAKIM, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) », docteur en science, en électrotechnique, université de Batna, 2010.
- [21] S. EL-AIMANI, « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
-

Bibliographie

- [22]- LINDHOLM M, « Doubly-fed drives for variable speed Wind turbines », Thèse de Doctorat, Université Technique de Denmark, 2003, Denmark.
- [23] SALLOUM G, « Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation », Thèse de doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2007.
- [24] R.AZAIZIA, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi-niveaux », Mémoire de magister en génie électrique, Université de Boumerdes, Algérie, 2008.
- [25] A.PETERSSON, « Analyse Modeling and control of doubly-fed induction generators for windturbines », thèse de licence en électrotechnique, université technologique de Chalamer, Göteborg, Sweden, 2003.
- [26] A.CHAIBA, « Commande par la Logique Floue de la Machine Asynchrone a Double Alimentation Alimentée en Tension », Thèse de Magister, Université de Batna, 2004
- [27] K. DAHMANEE ET R.CHIBAH, « Analyse et Commande d'un Convertisseur Matriciel Triphasé : Application à la Conduite d'une Machine Asynchrone », PFE ENP, Alger, 2001
- [28] S. EL AIMANI , « Modélisation de Différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat, d'Etat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [29] P. E.VIDAL « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat, I.N.P, de Toulouse, France, 2004.
- [30] SALAMA ET AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, de l'université des sciences et technologies de, Lille1 (USTL).
- [1a] **O. Bennouna**, « *diagnostic des systèmes linéaires dynamiques application à un système à énergie renouvelable de type éolien* », Mémoire de doctorat. CORSE 2006.
- [2a] **A. Mirecki** , « *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance.* », Mémoire de doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse 2005
- [3a] **N. Mekkaoui**, « *Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée* », .Mémoire de magister Université de Batna 2004.
- [4a] **I. Hamzaoui**, « *Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur* », Mémoire de magister ENP Alger, 2008.
- [5a] **S.Elaimani** « *Modélisation de Différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* », Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Centrale de Lille, 2005.
- [6a] **F. Poitiers**, « *Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de L'Energie Eolienne* », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [7a] **L.Khettache**, « *Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée* », Mémoire de magister Université de Batna, 2007.
- [8a] **F.Kendouli**, « *Etat de l'art et modélisation des microcentrales* » Mémoire de magister Université de Constantine 2007.
-

Bibliographie

- [9a] **S. Drid**, « *Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation* », Thèse de doctorat, Université de Batna 2005.
- [10a] **A. Aimer**, « *Emploi de la représentation temps-fréquence dans le diagnostic des défauts des machines asynchrones à cage* » Mémoire de magister, université d'Oran 2010.
- [11a] **O. Ondel**, « *Diagnostic par reconnaissance des formes : application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone* », Thèse de Doctorat d'Etat. Ecole Centrale de Lille 2006.
- [12a] **A. Brahim**, « *Contribution au diagnostic de machines électromécaniques: Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée* » thèse de doctorat, université de Saint Etien mars 2009.
- [13a] **G. Didier**, « *Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances* » Thèse de doctorat .29 Octobre 2004
- [14a] **S. Bachir** «*Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique* » Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France. 2002.
- [15a] **A. Ghoggal**, « *Diagnostic de la machine asynchrone triphasé ; model dédiée a la détection des défauts* » , Mémoire de magister Université de Batna,2005.
- [16a] **M. Benbouzid**, «*A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection* », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol 47, N°5 October 2000.
- [17a] **S. Laribi**, " *Synthèse des Méthodes de Diagnostic Appliquées à la Détection des Défauts dans les Machines Asynchrones* " .Thèse de Magister USTO,Oran 2005.
- [18a] **Y. Gritli A. Stefani , F. Filippetti**, « *Stator Fault Analysis Based on Wavelet Technique for Wind Turbines Equipped with DFIG*», *Clean Electrical Power*, 2009 International Conference on, Issue:9-11 June 2009, Pages:485 – 491
- [19a]**M. Sérgio, A. Cruz, A. J. Marques Cardoso** , « *Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extended Park's Vector Approach*»*Industry Applications*, *IEEE Transactions on* , Issue 5, Publication Year: 2001 , Page(s): 1227 – 1233.
- [20a]**N. Benouzza, A. Benyettou, A. Bendiabdellah, B. Kraloua ,D. Toumi** , «*Rotor Cage Faults Diagnosis in 3-Phase Induction Motors, by Park's Vector Approach*», *4th Jordanian International Electrical Electronics Engineering Conference* 2001.
- [21a]**M. Drif, N. Benouzza, B. Kraloua, A. Bendiabdellah and J.A. Dente**, «*Squirrel Cage Rotor Faults detection by Instantaneous Power Spectrum Approach*», *Proceeding of IEEE SDEMPED'4*, Sep 1-3 2001, Gorizia, Italy.
- [22a] **A. Bouzida** ; « *Diagnostic de défaut de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes* », Mémoire de magister ENP Alger, 2008.
- [23a]**H. Camblong**, « *Minimisation de l'Impact des Perturbation d'Origine Eolienne Dans La Génération D'Electricité Par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable* », Thèse de Doctorat Bordeaux 2003.
- [24a]**F.Boumaaraf**, « *Commande intelligente d'une association convertisseur statique -machine asynchrone à double alimentation* » .Mémoire de magister Université de Batna 2009.
-

Bibliographie

- [25a] **A. Yazidi, H. Henao, G. Capolino, D. Casadei, F. Filippetti** « *Double-Fed Three-Phase Induction Machine abc Model for Simulation and Control Purposes* » Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE, Issue 2005, pages 2560-2565.
- [26a] **A. Sayed-Ahmed, A. Nabeel. O. Demerdash**, "Analysis of Stator Winding Inter-Turn Short-Circuit Faults in Induction Machines for Identification of the Faulty Phase", Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE, Issue 2006, pages 1519 – 1524.
- [31] **H.S. VICATORS, J.A. TEGOPOULOS, FELLON**, IEEE « Transient State Analysis of A Doubly-FED induction generator under Three Phase short circuit » IEEE national Technical University of Athens, Department of electrical engineering 106 82, Athens, GREECE. IEEE Transactions on Energy conversion, Vol. 6, NO. 1, March 1991.
- [32] **JANAKA EKANAYAKE and NICK JENKINS**, « Comparison of the Response of Doubly Fed and Fixed-Speed Induction Generator Wind Turbines to Changes in Network Frequency », IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol.19, N° 4, pp. 800-802, December, 2004.
- [33] **B. ROBYNS, M. ESSELIN**, « Power control of an inverter. Transformer association in a wind generator », Electromotion, vol.6, No. 1-2, 1999, pp.3-7.
- [34] **P. BARRET**, « Régime transitoire des machines électriques tournantes ». Ecole supérieure d'Electricité, Eyrolles, Paris, 1982.
- [35] **J.C. PRESCOTT AND B.P. RAJU**. « The inherent instability of induction motors under condition of double supply ». The Institute of Electrical Engineers Monograph, Jan, 1958.
- [36] **KELBER C. AND SCHUMACHER W**, « Control of Doubly fed induction Machine as an Adjustable Motor/Generator », Proceedings of European Conference of Variable Speed in Small Hydro (VSSH), Grenoble, 2000.
- [37] **ACHOURI RADOUANE & HIDOUCHE MOHAMED**, « Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone « Simulation sur le logiciel SIMPLORER », Validation expérimentale sur banc d'essai » Thèse de ingénieur, Electrotechnique Ecole National Polytechnique, 2007.
- [38] **A. Meroufel**. « Commande scalaire Commande vectorielle Commande directe du couple » Thèse d'ingénieur d'état, Electrotechnique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2009.
- [39] **GUY SEGUIER, FRANCIS LABRIQUE**, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », tome 4 la conversion continu-alternatif.
- [40] **HOBERT BAUSIERE, GUY SEGUIER, FRANCIS LABRIQUE**, « Electronique de puissance, structure, fonction de base, principales applications », 8^{ème} édition.
- [41] **PASI PUTTONEN, YEKA SALO AND HEIKKI TUUSA**, « *Li vVind Power Plant Harmonics Reduction Using a Current-Source Inverter with a Controlled* », EPE 2001 – Graz
- [42] **ABBAS MOURAD, MECHENTEL MOHAMED**, « Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée par une Cascade à Trois Niveaux application à l'Energie Eolienne », Ingénieur d'Etat en Electrotechnique. ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE. Soutenue : 2006.
- [43] **E. M. BERKOUK**. « Contribution à la Conduite des Machines Asynchrones Monophasées et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects. Application aux
-

Bibliographie

- Gradateurs et Onduleurs Multi niveaux ». Thèse de doctorat, C.N.A.M, PARIS 1995.
- [44] BELAZZOUG, SEBAA, « Etude des redresseurs multi-niveaux à MLI ». PFE, ENP 1997, Alger.
- [45] J. Faucher and al. « Modélisation de la machine asynchrone en vue du diagnostic », Journées SDSE-00, Lyon, 2000.
- [46] G. BARAKAT, G. HOUDOUIN, B. DAKYO, E. DESTOBBELEER, H. HENAO, C. DELMOTTE, G. EKWE, G. A. CAPOLINO, L. BAGHLI, A. ABED, H. RAZIK, A. REZZOUG, S. BACHIR, S. TNANI, G. CHAMPENOIS, J.-C. TRIGEASSOU, V. DEVANNEAUX, B. DAGUES, J. FAUCHER, « Modélisation de la machine asynchrone en vue de la surveillance et du diagnostic », Journées SDSE-01, 14 décembre 2001, Villeurbanne, à paraître.
- [47] A. H. BONNETT, G. C. SOUKUP, « Cause and analysis of stator and rotor failures in three phase squirrel cage induction motors » IEEE Transactions on Industry Applications, Aug 1992.
- [48] M. MAYOUF. « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », thèse de magistère de l'université de Al Hadj Lakhdar –Batna, option énergies renouvelables, 2007.
- [49] T. DOUADI. « Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone », thèse de magistère de l'université de EL Hadj Lkhdar –Batna, option maîtrise d'énergie
- [50] A. BOUHEDDA. « Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne », thèse magistère de l'université de Mouloud Mammeri –Tizi-ouzou, option entraînements électrique, 07 juillet 2011.
- [51] S. EL AIMANI. « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologie de Lille I, 06 décembre 2004.
- [52] K. FERKOUS. « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », thèse magistère de l'université de Mentouri –Constantine, option énergies renouvelables, 4 juillet 2007.
- [53] L. LOUZE. « Production décentralisée de l'énergie électrique : modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée », thèse de doctorat de l'université de Mentouri –Constantine, 08 juillet 2010.
- [54] L. KHETTACHE. « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée », thèse de magistère de l'université de El Hadj Lakhdar –Batna, option énergie renouvelable, 2007.
- [55] A. GAILLARD. « Système éolien basé sur une MADA : Contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré Nancy I, 30 avril 2010.
- [56] REDJEM RADIA. « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magister UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2009.
- [57] A. MIRECKI. « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Avril 2005.
-

Bibliographie

[58]S. EL AIMANI. « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.

[59]HAMZAOUI ihssen. « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », thèse de magister, école nationale polytechnique Alger, promotion, 2008.

[60]POITIERS F. « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour L'utilisation de l'énergie Éolienne » thèse de Doctorat d'état en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes -2003.

Bibliographie

Annexe

Paramètres de la MADA :

Valeurs nominales : 4kw ;220/380 V ;-50 Hz;15/8.6 A ; 1440 tr/mn

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

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

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

$$L_r \text{ (Inductance de rotor)} = 0.1568 \text{ H}$$

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

Constantes mécaniques :

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

$$f_r \text{ (Coefficient de frottement)} = 0.001 \text{ N. m. s/rad}$$

; Paramètres de MADA utilisé dans la chaîne :

$$R_s \text{ (Résistance du stator)} = 0.012 \Omega$$

$$R_r \text{ (Résistance du rotor)} = 0.021 \Omega$$

$$L_s \text{ (Inductance d du stator)} = 0.0137 \text{ H}$$

$$L_r \text{ (Inductance de rotor)} = 0.0137 \text{ H}$$

$$M \text{ (Inductance mutuelle)} = 0.135 \text{ H}$$

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Nombre de pale =3

Annexe

Diamètre d'une pale $R = 3$

Gain du multiplicateur : $G=5.4$

Inertie $J = 0.2kg.m^2$

Coefficient $f = f_{vt}=0.017N. m. s/rd$

Equation de vent:

$Vent = 10 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t)$

Paramètres de la chaine

Valeurs nominales : 1.5MW ; 690V/15KV ; 50Hz ;

Paramètres de redresseur :

Résistance de la ligne : $R = 0.3\Omega$

L'inductance de la ligne : $L = 0.001H$

Capacité de filtrage $C = 0.2F$

La tension référence du bus continu : $U_{ref} = 722V$

La bande hystéresis : $Di = 0.1$

Annexe
