

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة البليدة 1
Université de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

BOUKHATEM HICHEM

&

MAIDI ABDEL ILLEH

pour l'obtention du diplôme Master en Électrotechnique option Machine Electrique

Thème

Analyse des performances d'une chaîne éolienne en régime déséquilibré

Proposé par : Mr KOUCHIH DJILALI

Année Universitaire 2013-2014

ملخص: هذا العمل يعالج النمذجة والمراقبة والمحاكاة الكهرو ميكانيكية للطاقة الكهربائية، كما يتحكم فيها عن طريق الدوار بواسطة محول مصنفوي مراقب بواسطة تقنية MLI، هذه الفكرة تتمثل في نظام تحكم منفصل للاستطاعة الفعالة والمتفاعلة، المتولدة عن الجزء الساكن من الآلة لضمان الكفاءة العالية وأعلى تنفيذ، ثم دمج نظام (الماكينة اللامتزانة الثنائية التغذية + المحول المصنفوي) في توربين هوائي سعيا لتعظيم طاقتها المستخرجة بطريقة MPPT، مع وضع مهمة للحصول على مرجعية للطاقة الفعالة متصلة بالطاقة القصوى الممنوحة من قبل الناعورة الهوائية. بعدها تطرقنا الى تأثير ظاهرة اللاتوازن على مردود السلسلة الطاقوية الهوائية.

الكلمات المفتاحية: الماكينة، اللامتزانة الثنائية التغذية، المحول المصنفوي، استراتيجية النمذجة MLI المحسوبة، نظام التحكم المنفصل للاستطاعة الفعالة والمتفاعلة، ناعورة هوائية، MPPT، السلسلة الطاقوية الهوائية.

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 à double alimentation-convertisseur statique dans une turbine éolienne, Afin de maximiser sa puissance extraite, la méthode MPPT (Maximum Power Point Tracking) est mise en œuvre 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 à l'analyse des performances d'une chaîne éolienne en régime déséquilibré.

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 is devoted to the performance analysis of a wind channel in unbalanced diet.

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

Acronymes

s, r	: Indice du stator, du rotor
d, q	: Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature
R_s, R_r	: Résistance statorique, rotorique
l_s, l_r	: Inductances de fuites des statoriques et rotoriques
l_s, l_r	: Inductance cyclique statorique et rotorique
M_{sr}	: Inductance mutuelle stator-rotor
M_s	: Inductance mutuelle entre les enroulements du stator
M_r	: Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor
Φ_s, Φ_r	: Respectivement flux statorique et rotorique
$\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{dq}$: Respectivement flux statorique et flux rotoriques sur les axes d et q
V_s, V_r	: Tension simple respectivement statorique et rotorique
θ_s, θ_r	: Angle électrique statorique, rotorique
θ_m	: Angle mécanique
ω_s, ω_r	: Pulsation statorique, rotorique
ω_m	: Pulsation mécanique
g	: Glissement
P	: Nombre de paire de pôle
P_s	: Puissance active statorique
Q_s	: Puissance réactive statorique
P_{vent}	: Puissance du vent
$P_{turbine}$: Puissance de la turbine

Listes des acronymes et abréviations

p	: Operateur de LAPLACE
ρ	: Masse volumique du vent
V_{vent}	: Vitesse du vent
C_{em}	: Couple électromagnétique
C_r	: Couple résistant
C_g	: Couple mécanique sur l'arbre de la MADA
C_{aer}	: Couple aérodynamique
C_{vis}	: Couple des frottements visqueux
C_p	: Coefficient de puissance
C_p^{opt}	: Coefficient de puissance optimale
β	: Angle de calage
S	: Surface balayée par la turbine
λ	: Facteur d'avance
Ω_{trb}	: Vitesse de la turbine
Ω_r	: Vitesse du rotor de la génératrice
Ω_s	: vitesse de champ statorique
C_t	: Couple de la turbine
R	: Rayon de la turbine
J_{trb}	: Moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales
J_g	: Moment d'inertie de la MADA
f	: Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA

Les abréviations

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

FFT : Fast Fourier Transform

MPPT : Maximum Power Point Tracking

Annexe

Paramètres de la MADA :

Valeurs nominales : 4.5 kw ;220/380 V ;−50 Hz;15/8.6 A ; 1440 tr/mn

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

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

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

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

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

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 la chaine

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

Paramètres de MADA utilisé dans la chaine :

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

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

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

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

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

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Nombre de pale =3

Diamètre d'une pale R = 35.25

Gain du multiplicateur : G=90

Inertie J = 1000Kg. m²

Coefficient f = 0.0024 N. m. s/rd

Equation de vent :

$$\text{Vent} = 10 + (0.2\sin(0.1047 t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645^* t))$$

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 bonde hystérésis : $D_i = 0.1$

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'Énergie Dédiées `a une Eolienne de Petite Puissance », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, (2005).
- [7] **J. MARTIN**, « Énergies 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 doctorates 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.TARAF**, « Etude du Stockage Inertiel d'Énergie 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.H.AL-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.
- [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 doublealimentation », 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**,« AnalyseModeling 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).
-

[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.ESELIN**, « 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 DjillaliLiabès , Sidi Bel Abbés, 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 vWind Power Plant Harmonics Reduction Csing 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 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.

[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.

Cites :

[2]www.greenpeace.org/lebanon

[3]www.nrel.gov/analysis/does/costcurves

[4]www.wind-energie.de

[5]www.windpower.org/fr/core.htm

I.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, ce 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.

I.2. Impact des énergies renouvelables sur l'environnement

I.2.1. Energies renouvelables, définitions, ressources et exploitation

I.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 génèrent certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que des carburants 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 des ER (biomasse 5,5%, éolien 1,5%, géothermie 0,5% et le 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].

I.2.1.2. Energies renouvelables dans le monde

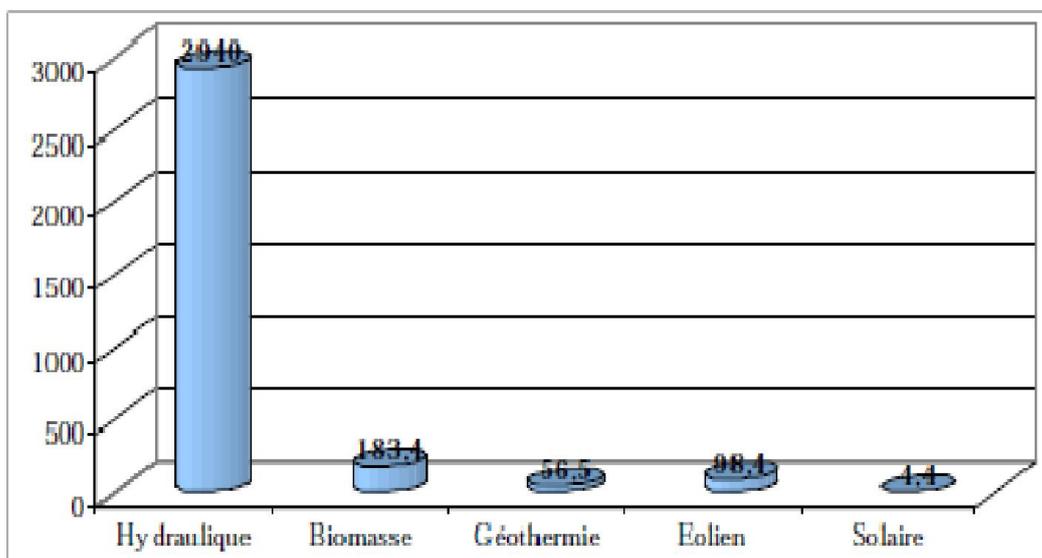


Figure (I.1). La production mondiale d'électricité en 2012

I.2.1.3.Énergie 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 sert 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 le Pélamis, sorte de ver en 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]

I.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 injecté 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.

I.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 photovoltaïque. 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%),

I.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) où 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.

I.2.1.5.Énergie 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, A 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.

I.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, tel 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.

I.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.

Direct : 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.

I.3. Etat de l'art de l'éolien

I.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^e siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX^e siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive [6].

Les turbines éoliennes font leur apparition au Canada en 1700 grâce aux colons qui les utilisent pour moudre le grain. En (1887-1888) L'américain Charles F. Brush, un scientifique de Cleveland en Ohio, construit la première éolienne qui produit du courant pour 12 batteries, 350 lampes à filament, 2 lampes à arc à charbon et 3 moteurs. Haute de 17 mètres et composée de 144 pales en cèdre, elle avait une puissance de 12 kW. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être redécouverte et de nouveau utilisée. Le Premier parc d'éoliennes en mer fait leur apparition en 1971 au large du Danemark d'une puissance totale de 5 MW. Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [6].

I.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 mats et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des

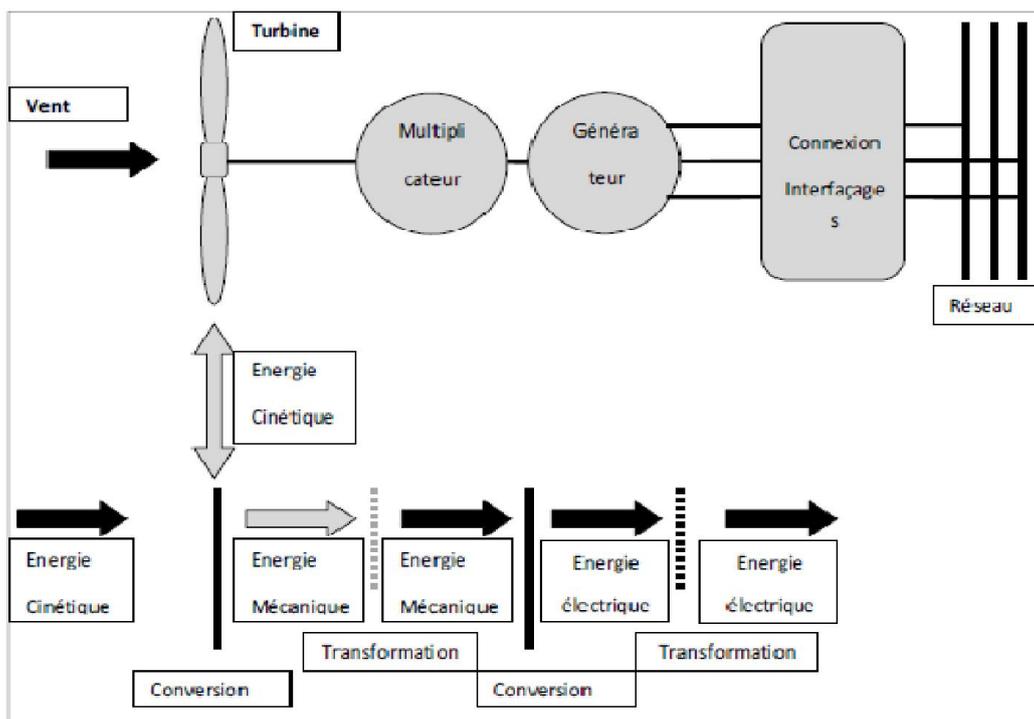
éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences [7]. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la 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.

1.3.3.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(1.2).principe de conversion d'énergie

I.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.

I.3.4.1. Par rapport à leurs axes

I.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

I.3.4.1.1a. 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].

I.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 multi pales, [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).

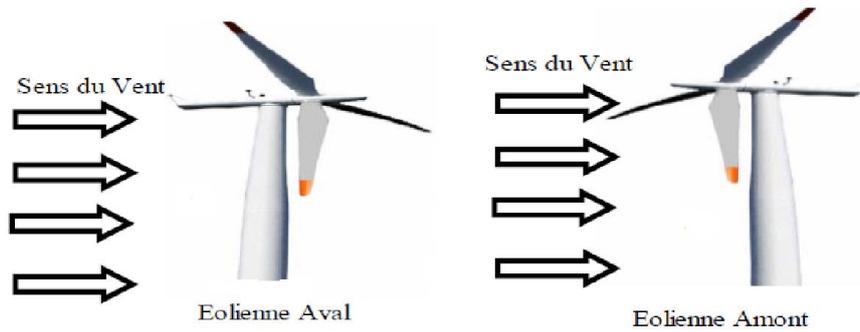


Figure (I.3). Type de montage de la voilure.

I.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.

I.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

1.3.4.1.2e. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal

Avantages

- ✓ Un rendement plus élevé;
- ✓ Un cout 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].

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

On peut classifier les éoliennes selon leurs gammes de puissances et leurs diamètres

Figure (I.5).

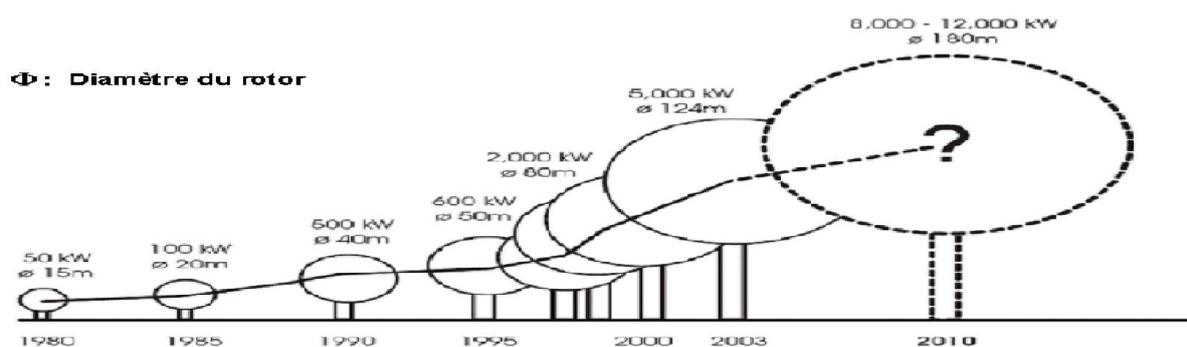


Figure (I.5).Classification des éoliennes selon leurs gammes de puissances et leurs diamètres

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

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

Tableau (I.1).Dimensions des aérogénérateurs [13]

I.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.

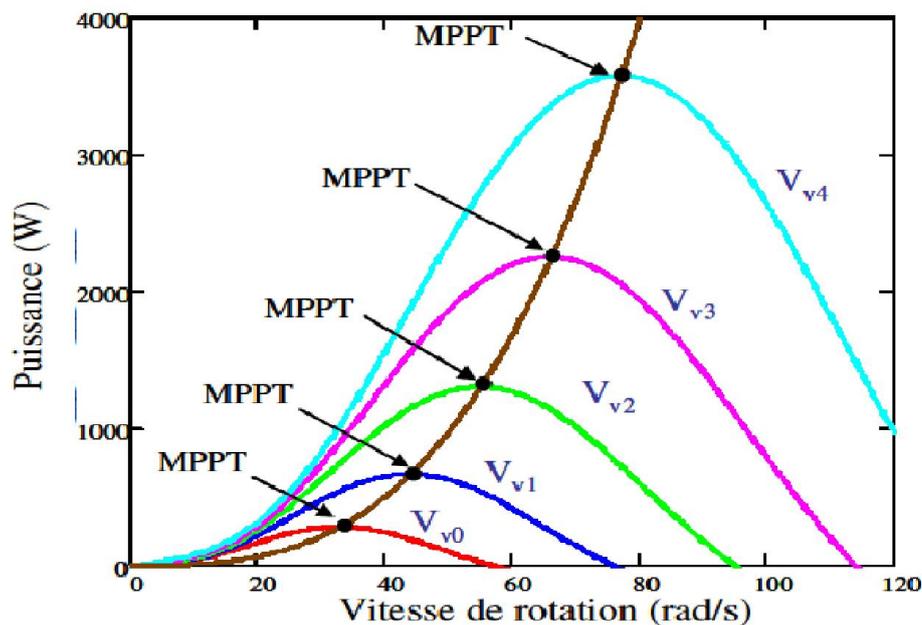
I.3.4.2.1a. Régulation mécanique

- 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.

I.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(1.6). Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent

I.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.

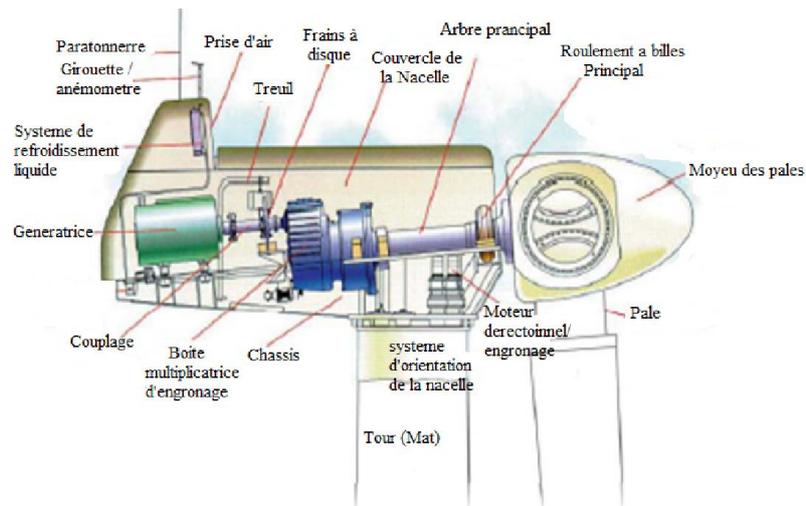


Figure (I.7). Principaux composants d'une éolienne.

I.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

I.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.

I.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

I.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

I.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 [15].

I.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) [15].

I.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.

I.3.5.5. Frein

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

I.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.

I.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

I.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 - 40 tr/min) [14].
- **L'arbre secondaire:** il entraîne la génératrice à des vitesses élevées (environ 2000 tours/minute) et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence (Figure I.15) [15].

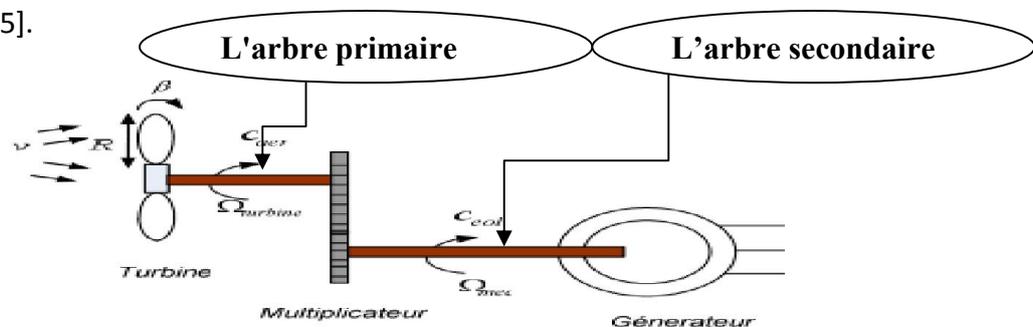


Figure (I.15). L'arbre de transmission.

I.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.

I.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.

I.3.5.10a. Anémomètre

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de control 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

I.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.

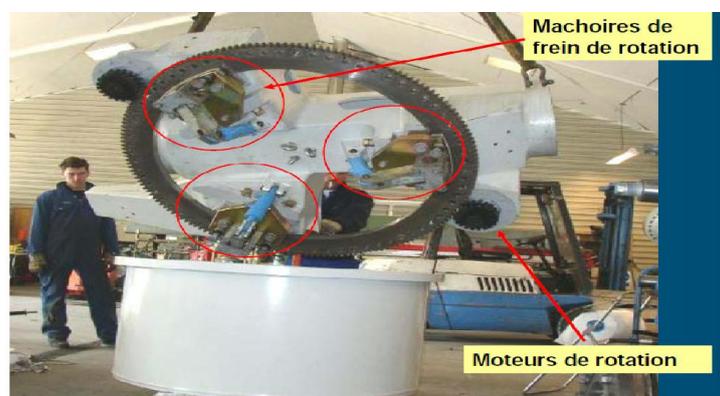


Figure (I.18). Système d'orientation de la nacelle

I.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).

I.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

I.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.

I.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 ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

- ✓ L'impact visuel a resté 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 gestionnaires 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 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.

I.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.

I.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.

I.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.

I.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.

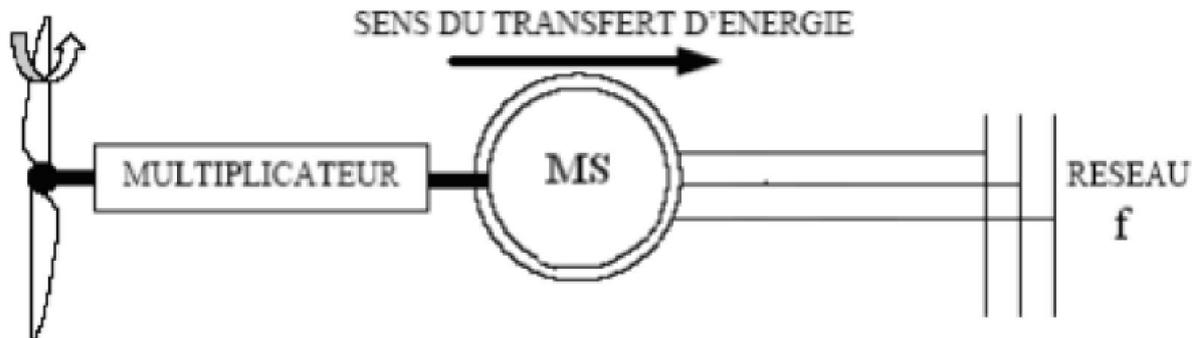


Figure (I.21). Machine synchrone connectée directement au réseau

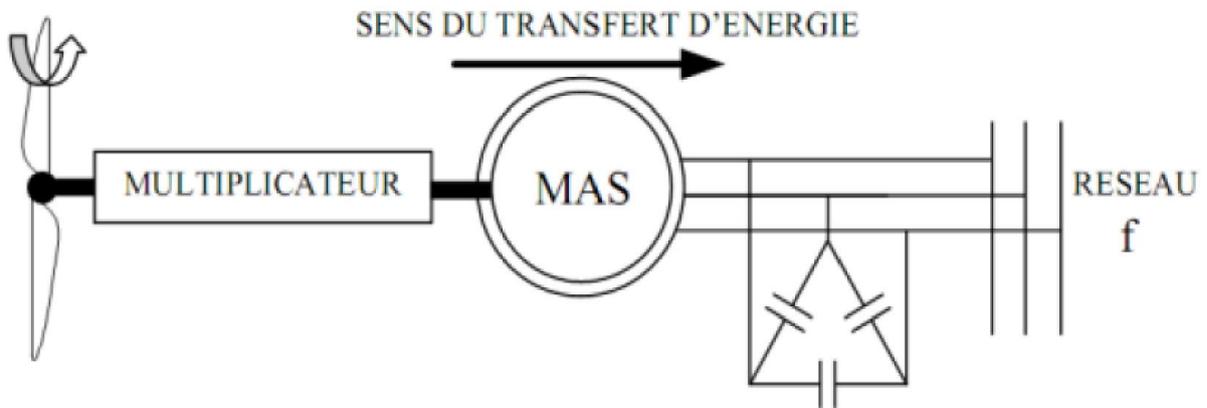
I.4.1.2. Générateur asynchrone

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'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

I.4.1.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice à cage d'écureuil 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

I.4.1.2.2.Machine asynchrone à double alimentation

À la place du rotor à cage d'écurueil 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.

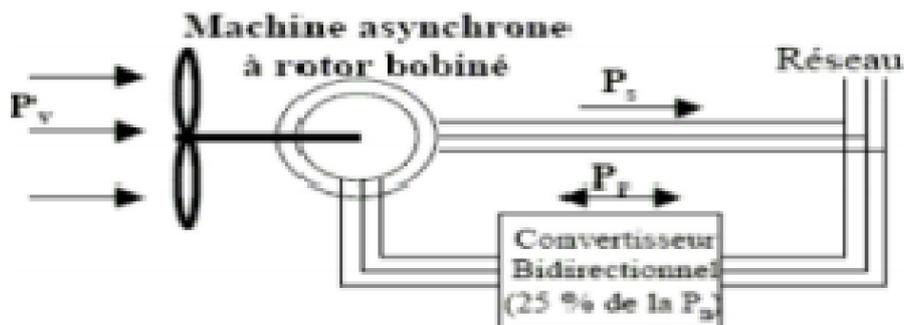


Figure (I.23).Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné.

I.5. Etat de l'art de la MADA

I.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 est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur de puissance [20].

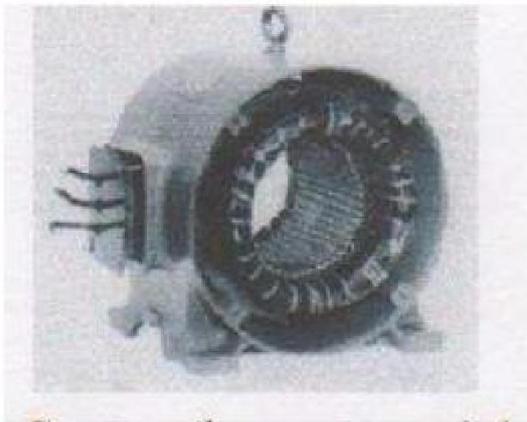


Figure (I.24). stator à induction



Figure (I.25). Rotor bobiné

I.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 I.26)

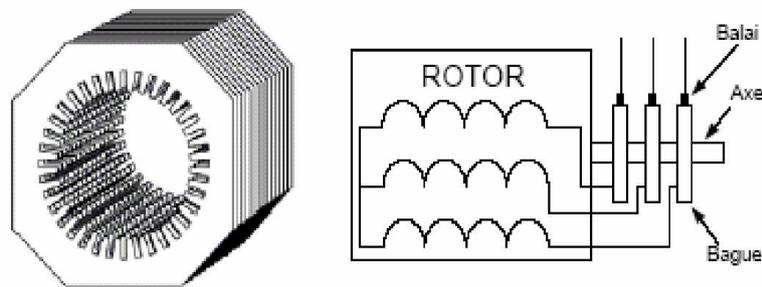


Figure (I.26). Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [20]

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].

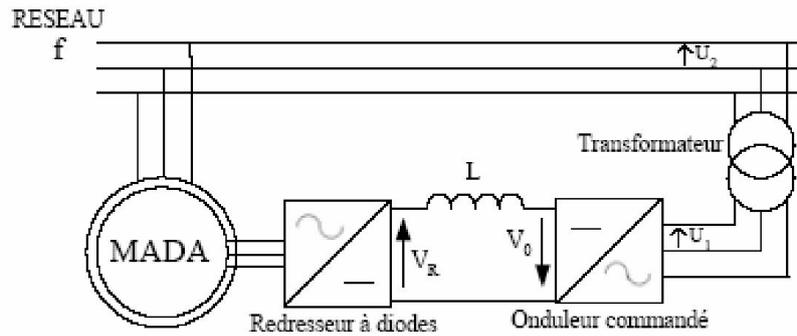


Figure (I.27). Cascade hypo synchrone

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.

I.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)

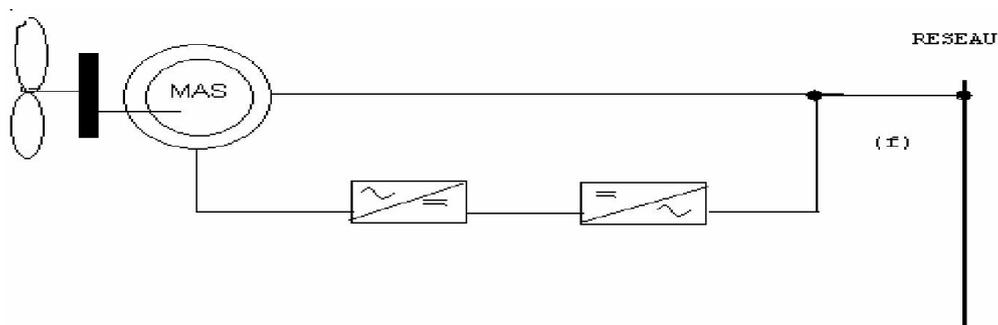


Figure (I.28). Machine asynchrone à double bobinage statorique.

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement 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.

1.5.2.2. 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 fournir, $(1- g) p$, 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.

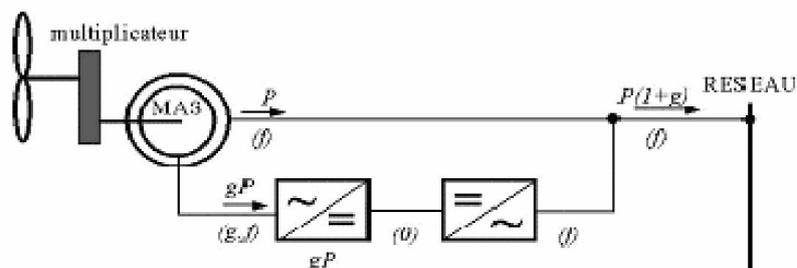


Figure (I.29). Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

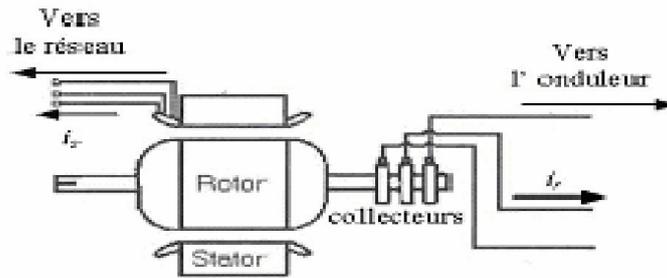
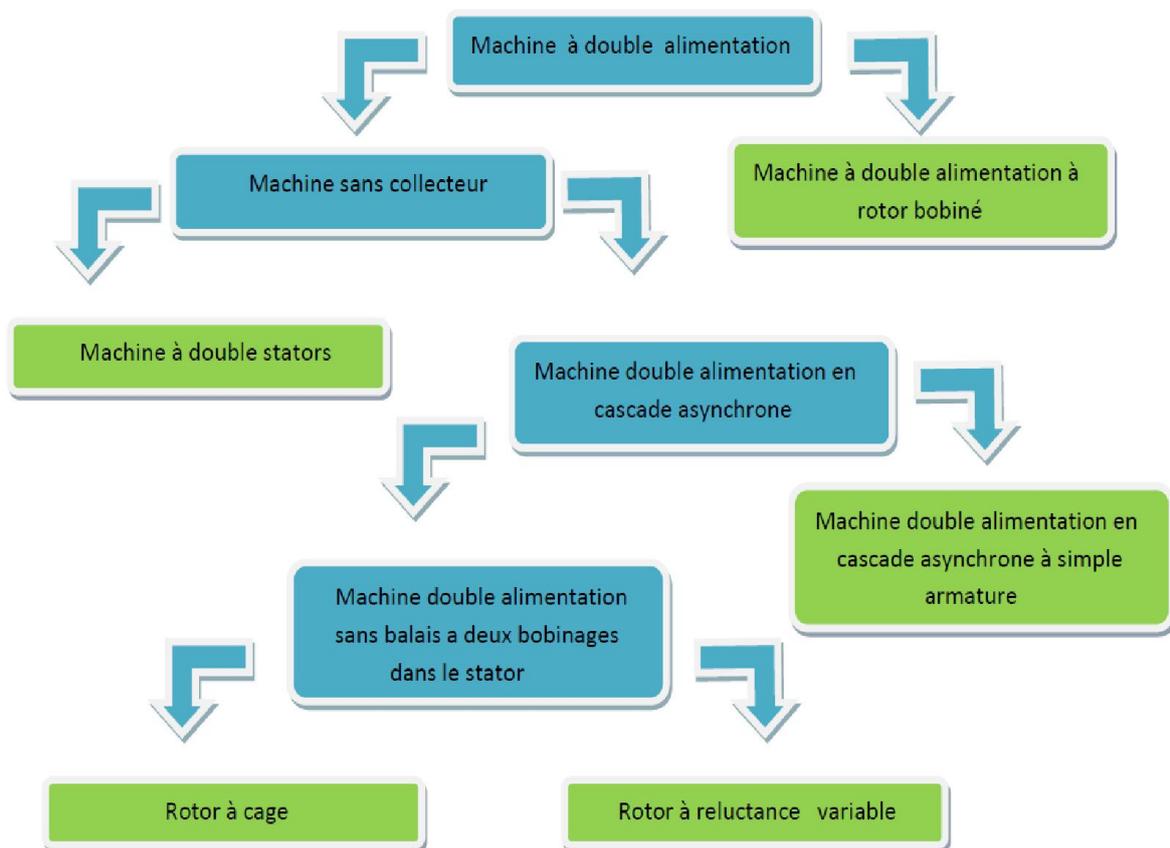


Figure (I.30). Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices

I.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]. Le diagramme de classification est ci-dessous :



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 détaillés ci-dessous

I.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]

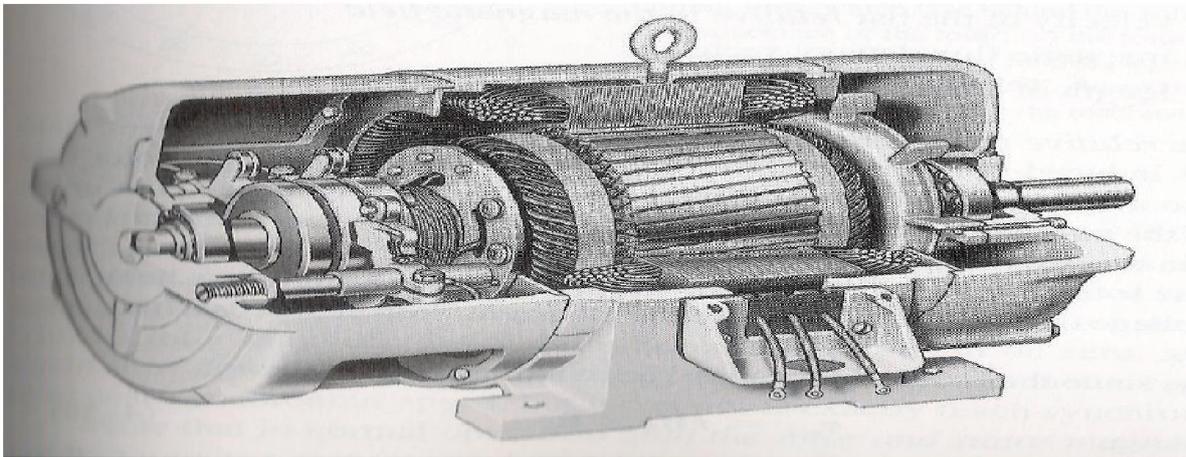


Figure (I.31). Coupe d'une machine asynchrone à rotor bobiné (standard)

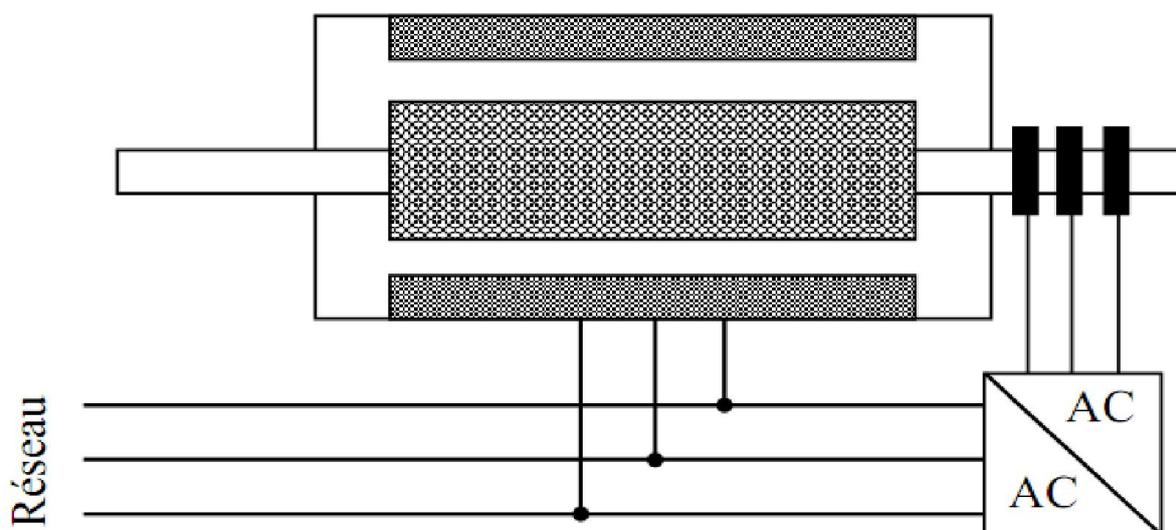


Figure (I.32). Schéma de principe de la machine à double alimentation à rotor bobiné (standard)

1.5.3.2. Machine asynchrone à 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 connectée 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.

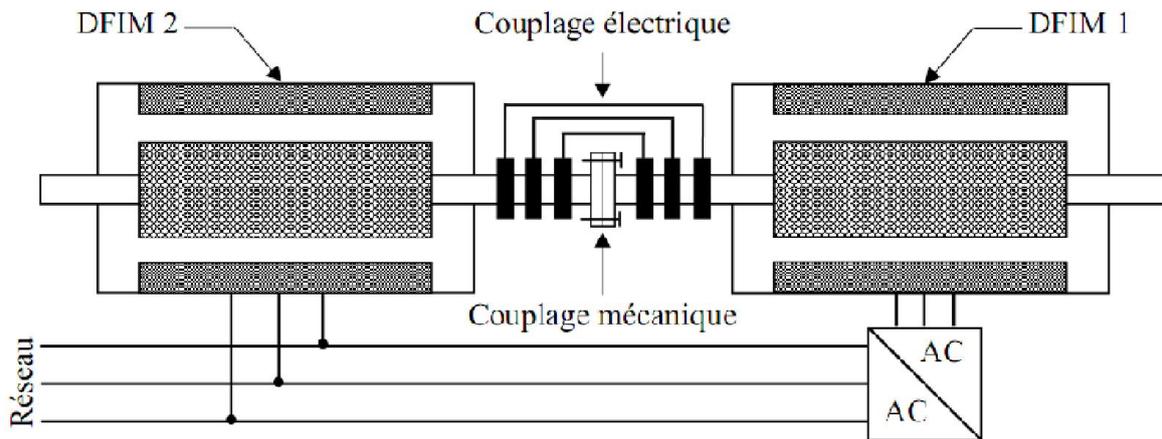


Figure (I.33). Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone

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 à double alimentation sans balais.

1.5.3.3. 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.

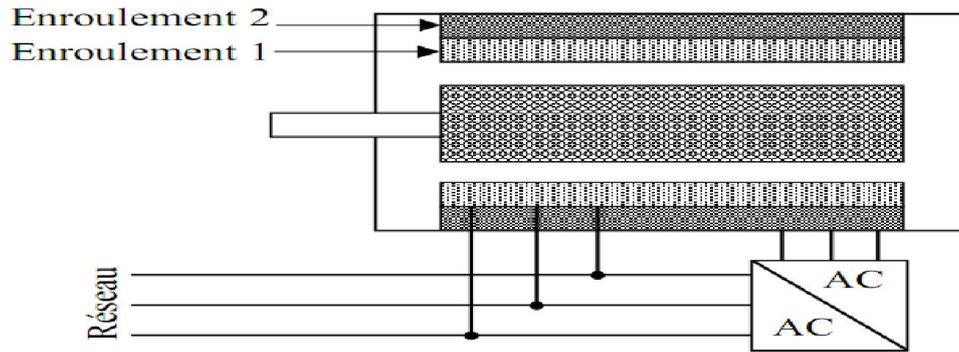


Figure (I.34). Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais

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].

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

Le tableau (I.2) donne une brève classification et comparaison de différentes 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, tous 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(1.2). Classification et comparaison des différentes variantes de la machine à double alimentation

Commercialement, il est difficile de prévoir quel type de machine à double 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 élever 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. [20]

I.5.5.Mode de fonctionnement de la MADA

I.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, P_s La puissance transitant par le stator, P_r 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].

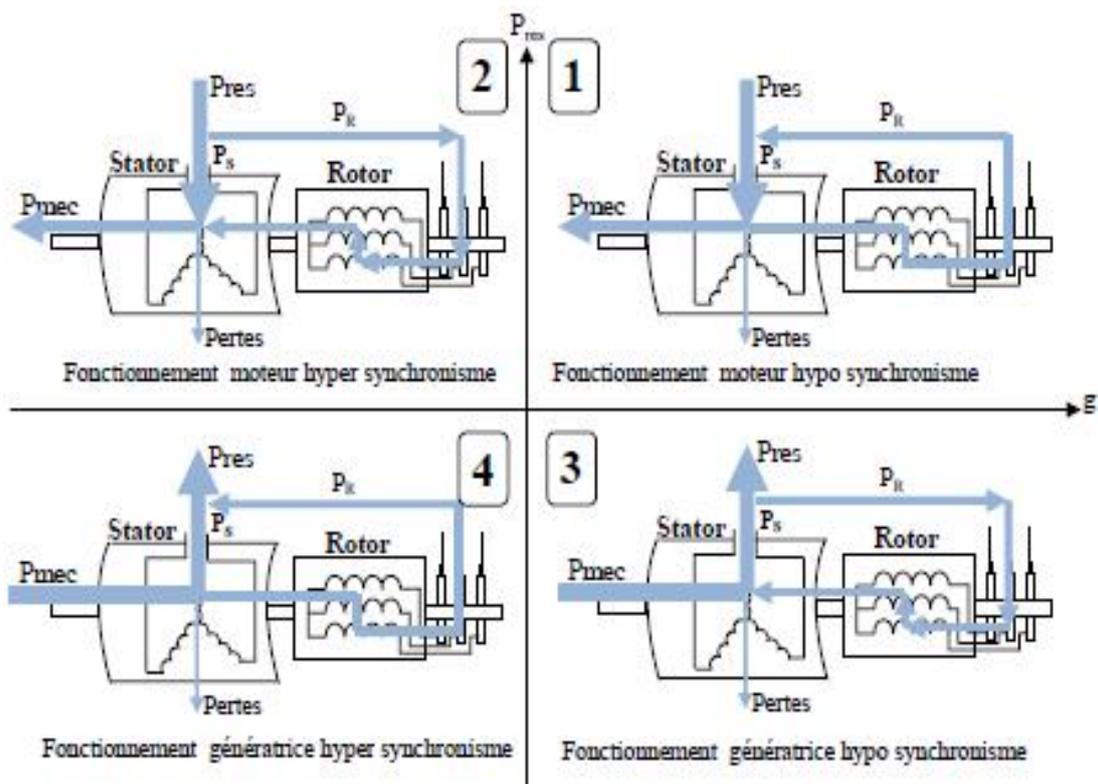


Figure (I.35).Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [19].

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 synchronisme.

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 fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près.

Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_{mec}$ 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 (1.3) 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

I.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.

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

I.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].

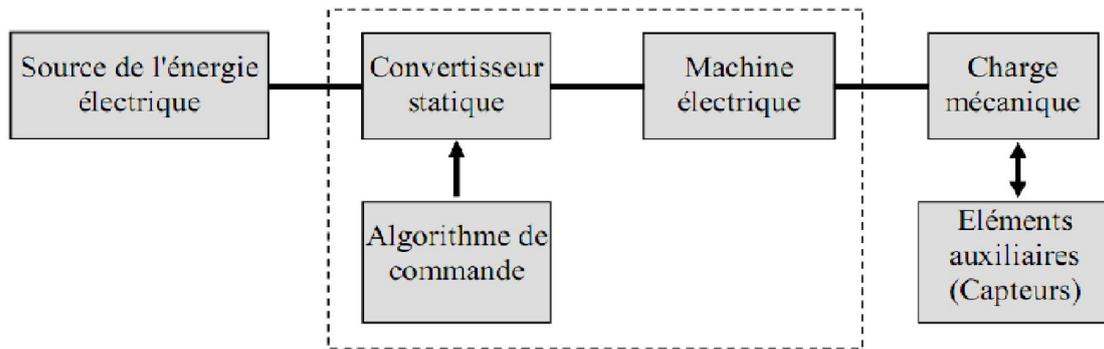


Figure (I.36). Architecture d'un système d'entraînement à vitesse variable

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.

1.5.6.2. 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 énergie 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 [20]. 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].

1.5.6.2.1. 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].

1.5.6.2.2. Type de machin 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

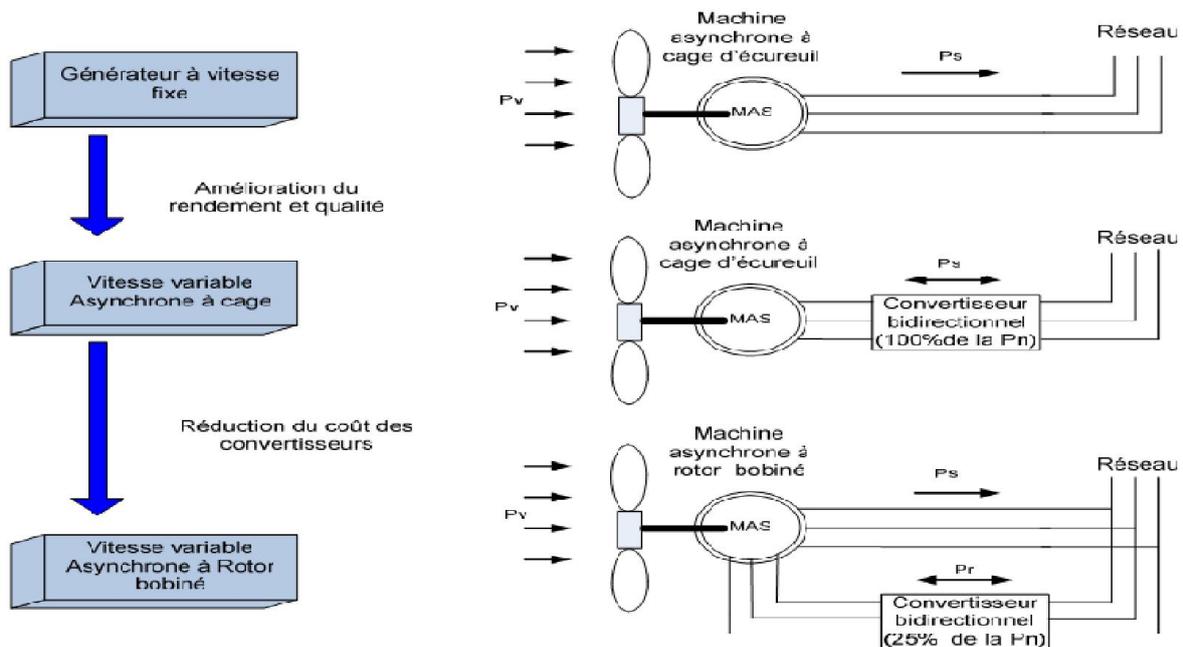


Figure (I.37). Evolution de la configuration électrique

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]

I.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].

I.5.8.Avantages et inconvénients de la MADA

Nous allons aborder dans ce paragraphe quelques avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable

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 bi-directionnalité 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 toutefois entraîner des dV/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements [32].

I.6. 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.

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.

II.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 à MLI 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 ».

Premier partie :

Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.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 $\Omega_s = \frac{w_s}{p}$ où w_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.

II.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 courant et des tensions est égale a zéro.

- Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :
- L'additive 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.

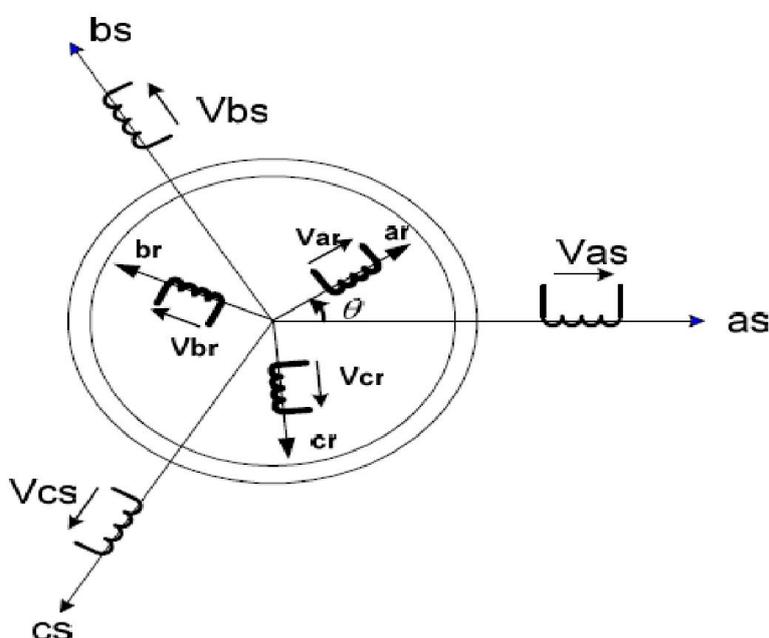


Figure (II.1). Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation

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].

II.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

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

Au rotor

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

$$[V_r] \neq 0$$

Les flux sont donnés par :

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

Avec

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} v_{Ar} \\ v_{Br} \\ v_{Cr} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} i_{Ar} \\ i_{Br} \\ i_{Cr} \end{bmatrix}$$

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

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

Les flux sont donnés par:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

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 :

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

Avec

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

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

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

II.2.3. Equations mécaniques de la machine

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

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

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

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

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).

II.2.4. Modèle de la MADA dans le repèredq

II.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].

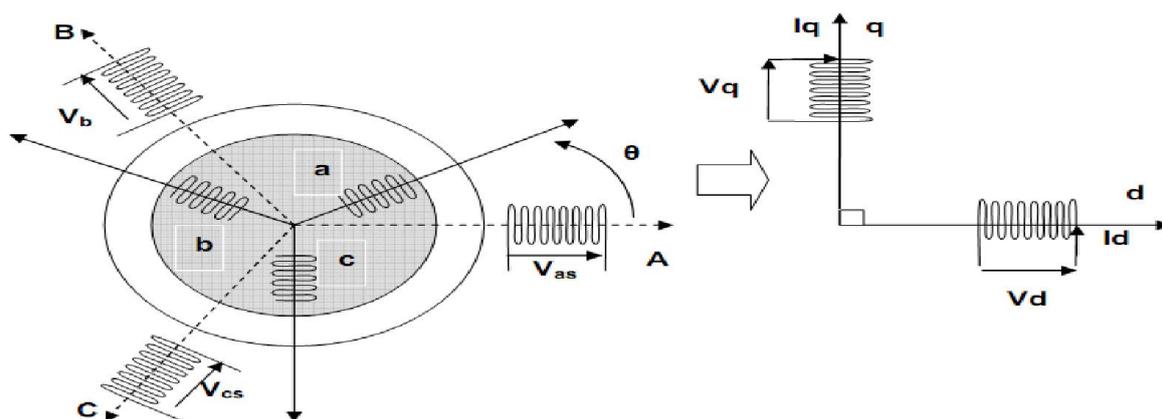


Figure (II.2). Passage du triphasé au biphasé La matrice de transformation est définie par :

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

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

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

II.2.4.2. Modélisation de la MADA dans le repère de PARK

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

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

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

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

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

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad \begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases}$$

Tel que :

$L_s = l_s - M_s$ Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$ Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$ Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

Les équations électriques sont :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - w_e \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + w_e \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II. 7})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (w_e - w) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (w_e - w) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 9})$$

Avec $w_e = \frac{d}{dt} \theta_e$ et $\begin{cases} \theta_e = \theta_s = \theta \\ w = \frac{d}{dt} \theta \end{cases}$

II.2.4.3. Choix de la référence

II.2.4.3.1. Référentiel lié au stator

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

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

II.2.4.3.2. Référentiel lié au rotor

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

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

II.2.4.3.3. Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $w_e = w_s$. 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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - w_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + w_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (w_s - w) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (w_s - w) \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II. 12})$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ \frac{J}{p} \frac{dw_m}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \end{array} \right. \quad (\text{II. 13})$$

II.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 $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}]^t$ comme vecteur d'état et les grandeurs V_{dr}, V_{qr} comme variable de commande. [36]. Après le calcul, nous aboutissons au système suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{ds} - w_s \Phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{qs} - w_s \Phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} + (w_s - w) i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{ds} - \beta \cdot w \Phi_{qs} - \beta V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - (w_s - w) i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{qs} + \beta \cdot w \Phi_{ds} - \beta V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{qr} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{p\mu}{J} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} w \end{array} \right. \quad (\text{II. 14})$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_s = \frac{R_s}{L_s} \\ \sigma_r = L_r \cdot \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \\ \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{L_s^2 \sigma_r} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \beta = \frac{M}{L_s \sigma_r} \\ \mu = \frac{3M}{2L_s} \end{array} \right.$$

II.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 réseau pour :

- Démarrage à vide et en appliquant du couple de charge à $t= 1$ s de valeur égale au couple nominale, $C_r = 26$ Nm.

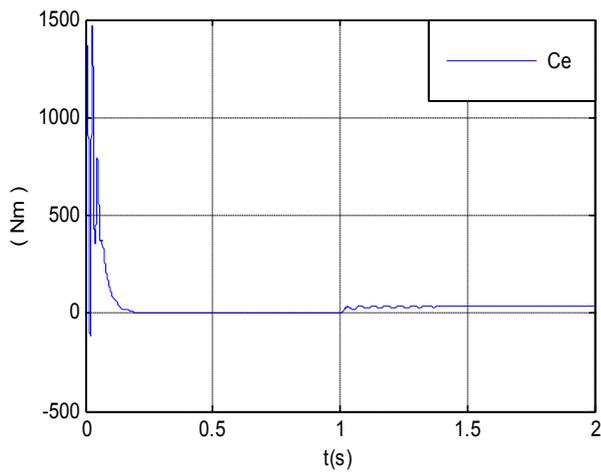


Fig.(II.3). Couple électromagnétique

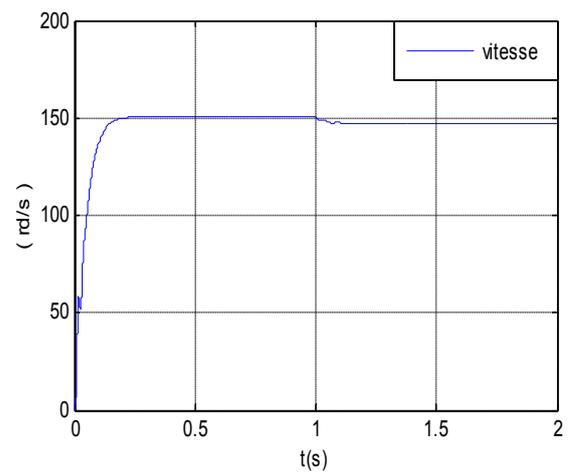


Fig.(II.4). Vitesse de rotation

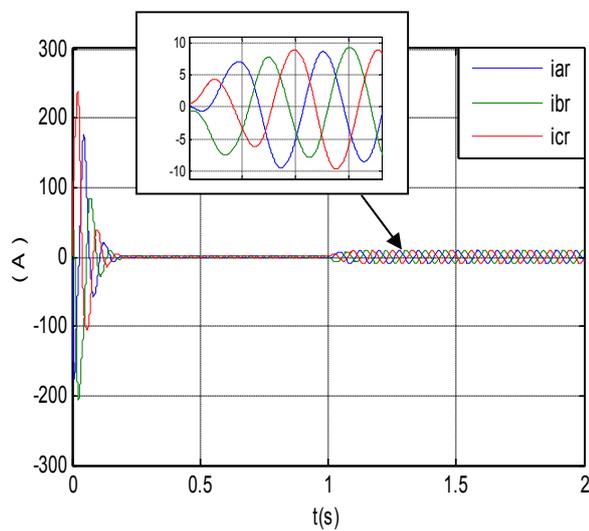


Fig. (II.5). Courant rotorique réelle

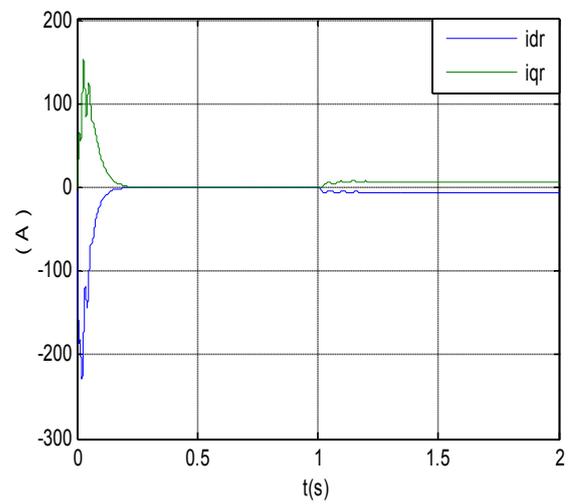


Fig. (II.6). Courant rotorique de Park

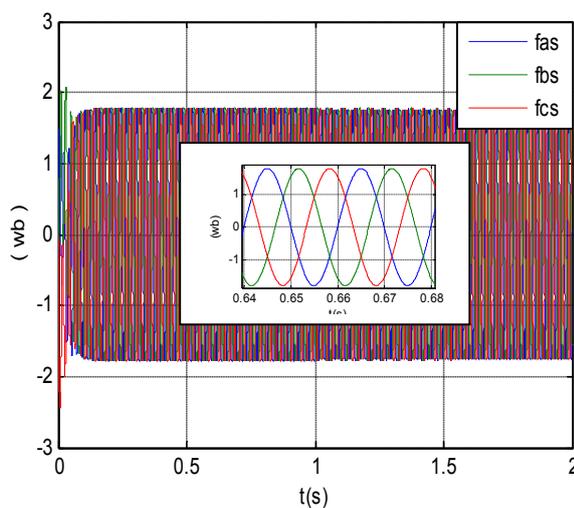


Fig. (II.7). Flux statorique réelle

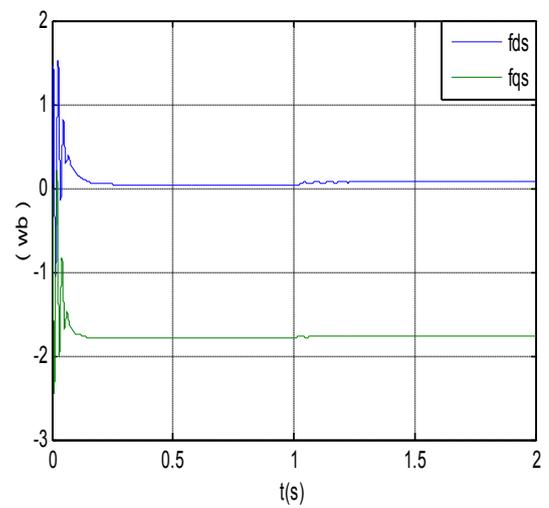


Fig.(II.8). Flux statorique de Park

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 150 rad/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 0.035Wb, -1.79 Wb.

Si on applique un couple résistant égale au couple nominale $C_r = C_{en} = 26$, 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.

Deuxième partie

Modélisation de la cascade redresseur-onduleur-MADA

II.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 ondes de tensions à amplitude 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 antiparallèle. 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].

II.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_{i0} en fonction des signaux de commande S_i et en tenant compte du point fictif « 0 » représenté sur la Figure (II.9)

$$v_{i0} = V_{dc} \left(S_i - \frac{1}{2} \right) \quad (\text{II.15})$$

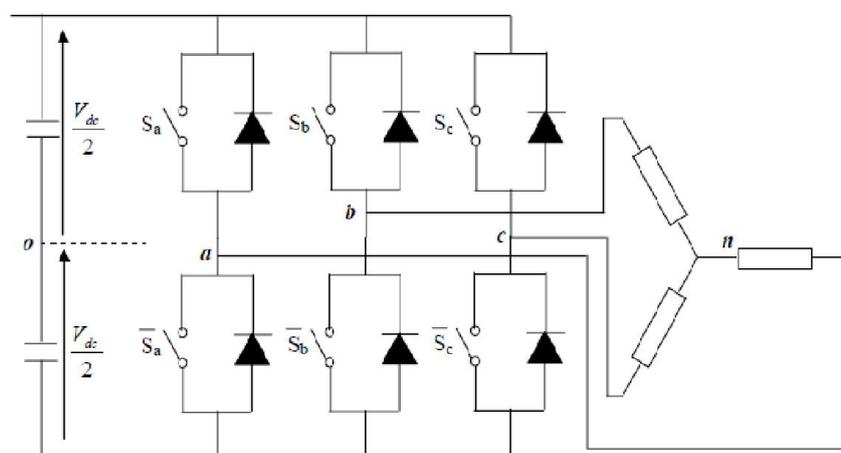


Figure (II.9). L'onduleur de tension associé à La machine

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 :

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

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

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

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

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{a0} - v_{b0} \\ v_{bc} = v_{b0} - v_{c0} \\ v_{ca} = v_{c0} - v_{a0} \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

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

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 19})$$

Des relations suivantes:

$$\begin{cases} v_{a0} = v_{an} - v_{n0} \\ v_{b0} = v_{bn} - v_{n0} \\ v_{c0} = v_{cn} - v_{n0} \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

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 [37]. 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* [37].

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

La modulation triangulo-sinusoïdale 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 sinusoïdale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale. 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 sinusoïdale :

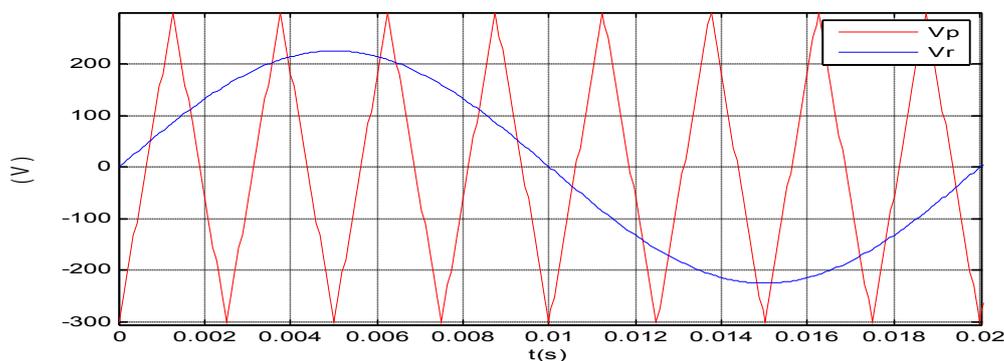
- L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence :

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

- 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:

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

Le schéma de principe est donné par la Figure (II.10) :



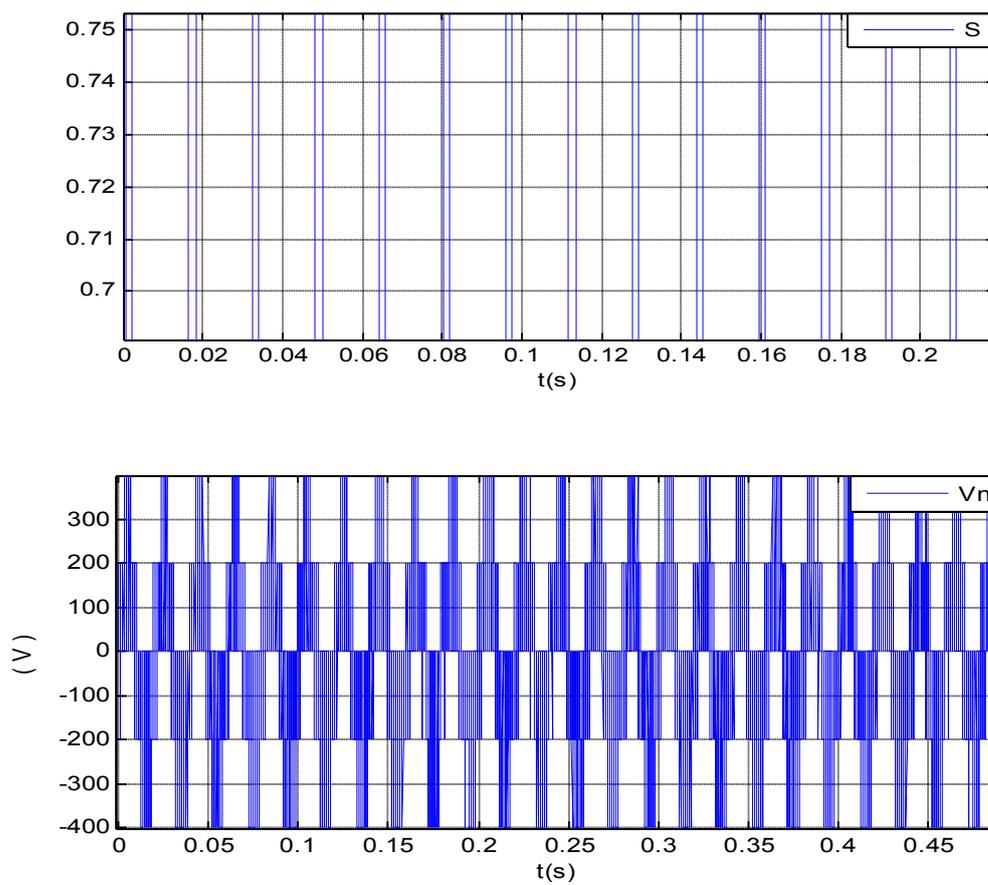


Fig.(II.10) : Principe de la commande MLI- intersective.

II.4.Modélisation de redresseur MLI à bonde 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 électrique 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 commande du redresseur triphasé à deux niveaux [44]. On distingue pour le convertisseur à deux niveaux 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 par [42] présente une bonne dynamique, une implantation simple.

II.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.11) montre le schéma de principe d'un redresseur MLI [42].

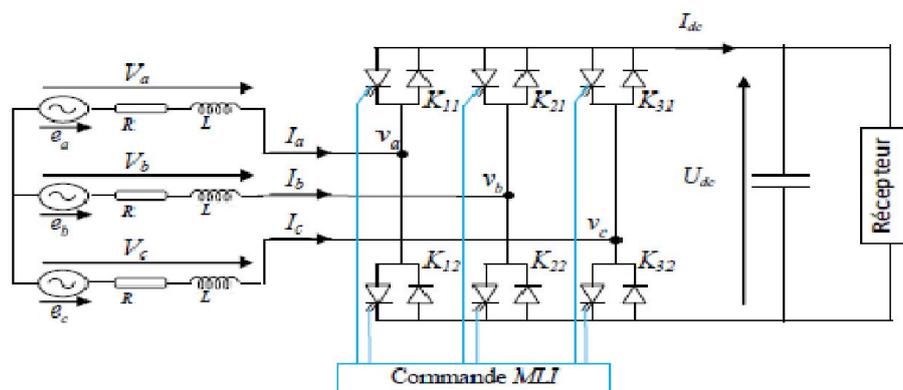


Figure (II.11). Schéma de principe d'un redresseur MLI [43]

II.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.

II.4.3. Modèle de redresseur MLI

Les tensions entre les lignes sont donnés par :

$$\begin{cases} V_{ab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ V_{bc} = (S_b - S_c)U_{dc} \\ V_{ca} = (S_c - S_a)U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II. 24})$$

D'où on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{cases} V_a = f_a U_{dc} \\ V_b = f_b U_{dc} \\ V_c = f_c U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II. 25})$$

Avec :

$$\begin{cases} f_a = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \\ f_c = \frac{2S_c - (S_b + S_a)}{3} \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

II.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:

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

Et la tension d'entrée du redresseur peut être écrite comme suit :

$$v_n = U_{dc} \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad (\text{II. 28})$$

$$n = a \text{ ou } b \text{ ou } c$$

II.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 :

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

Donc :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (II.32)$$

Alors, pour le coté alternatif du redresseur on peut écrire:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - U_{dc} \left(S_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_a - U_{dc} \left(S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - U_{dc} \left(S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_b - U_{dc} \left(S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - U_{dc} \left(S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_c - U_{dc} \left(S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \end{cases} \quad (II.33)$$

La combinaison des équations (II.32), (II.33) nous permet de tracer le schéma fonctionnel triphasé représenté dans la Figure (II.12).

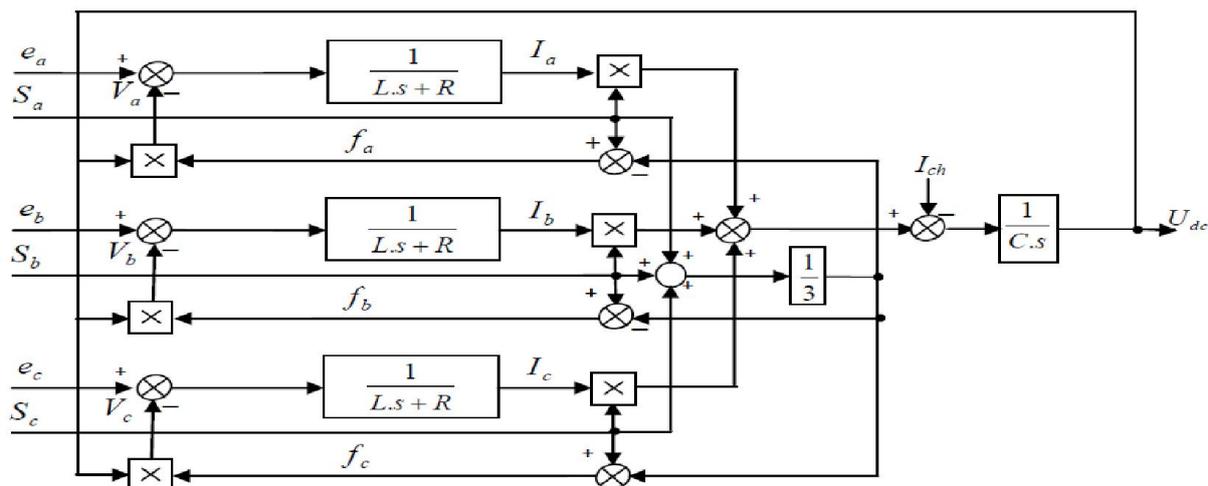


Figure (II.12). Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI

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 tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence U_{dc-ref} . La sortie du régulateur produit les ordres de commande pour les transistors du redresseur comme l'indique la Figure (II.13) [44].

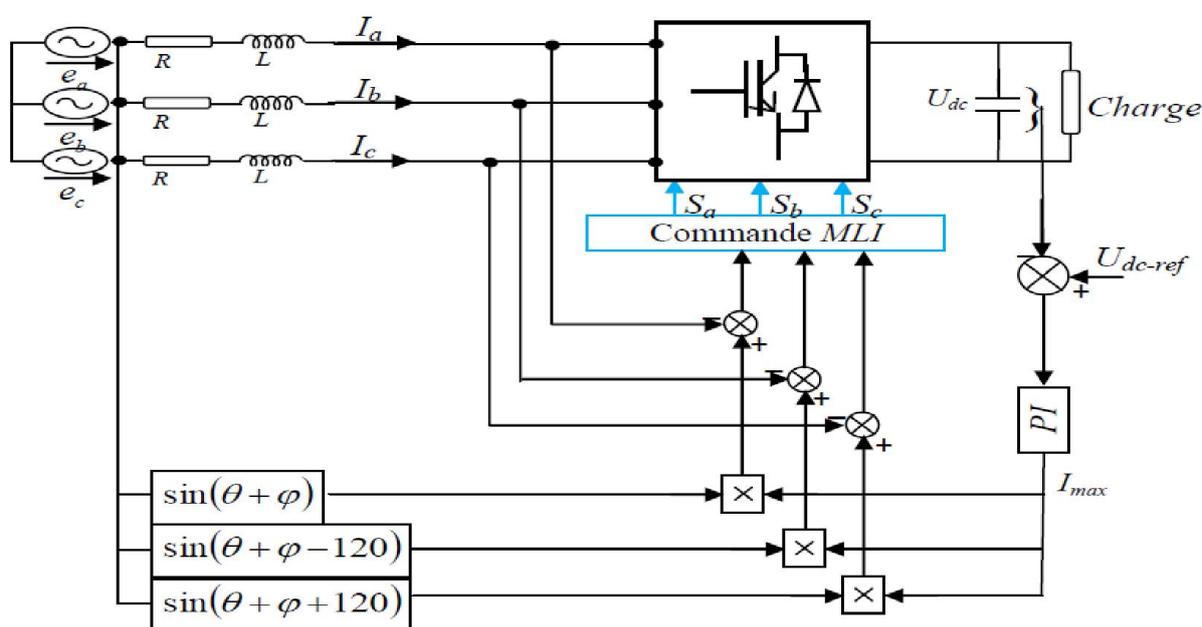


Figure (II.13). Redresseur MLI triphasé et sa commande

II.4.6. Commande de redresseur MLI par hystérésis en courant

La stratégie de commande du courant par hystérésis est la solution la plus convenable pour toutes les applications de contrôle du courant des redresseurs ou les besoins en 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.

II.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 Δi appelée bande ou fourchette d'hystérésis. Cette méthode permet le contrôle de la fréquence de commutation des interrupteurs par action sur la largeur Δi c'est pourquoi les performances de cette stratégie sont fortement liées à la largeur Δi 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 :

$$\begin{aligned} \varepsilon_k \geq \Delta_i &\Rightarrow s_r = 0 \\ \varepsilon_k \leq -\Delta_i &\Rightarrow s_r = 1 \\ \varepsilon_k &= i_{ref} - i_{mes} \end{aligned}$$

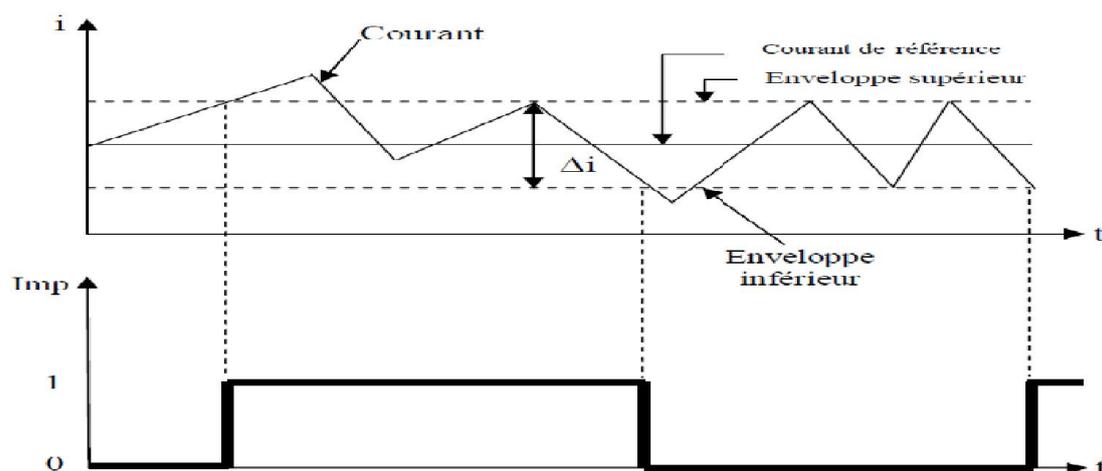


Figure (II.14). Principe du Contrôle par hystérésis.

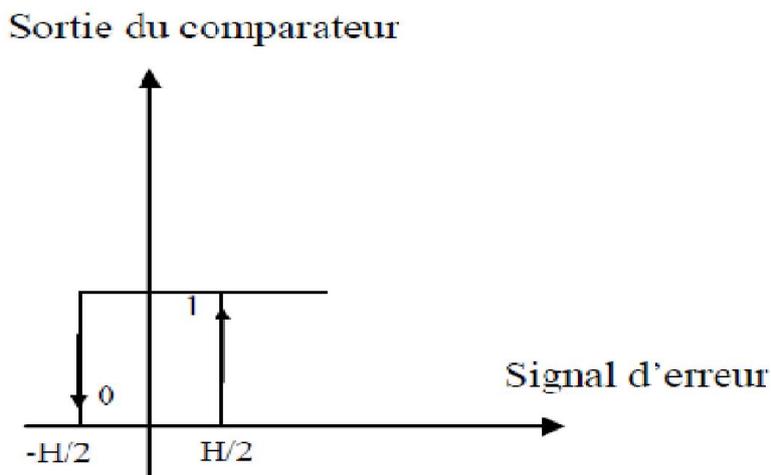


Figure (II.15). Modulateur MLI à bande d'hystérésis

II.5. Résultats de simulation

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 $C_r = 26 \text{ Nm}$.

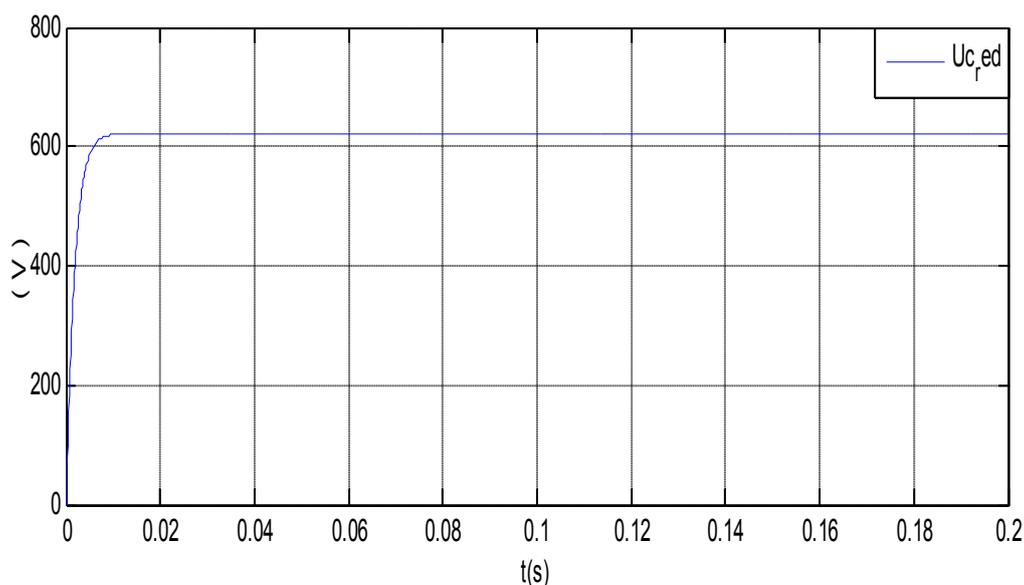


Fig. (II.16). La tension du bus continu

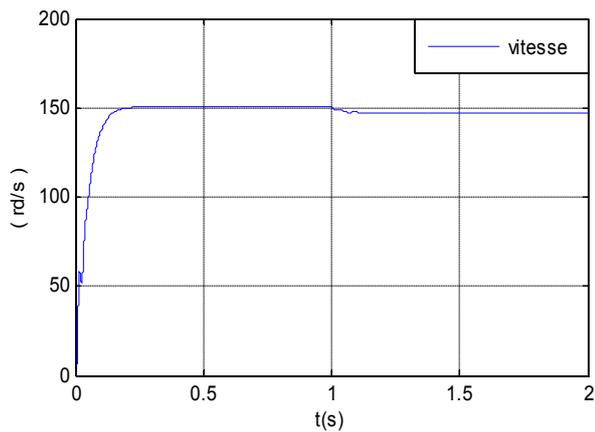


Fig.(II.17). Vitesse de rotation de la MADA alimentée par **réseau**

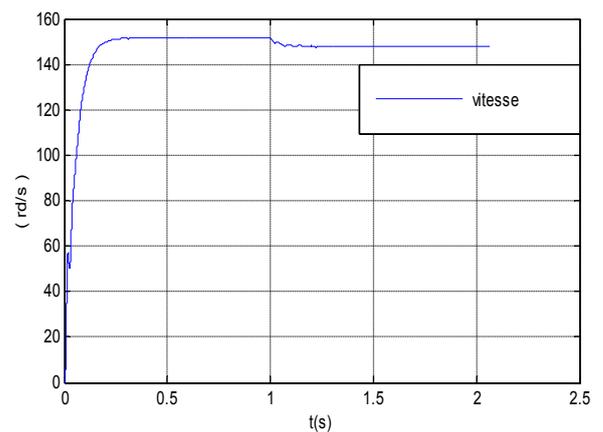


Fig.(II.18). Vitesse de rotation de la MADA alimentée par **la cascade**

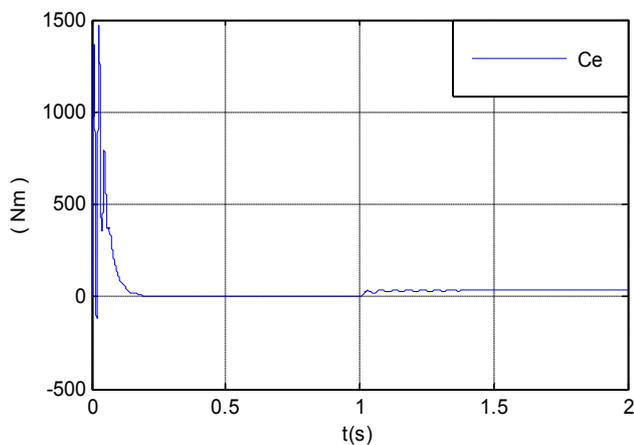


Fig. (II.19) : couple électromagnétique de la MADA alimentée par le **réseau**

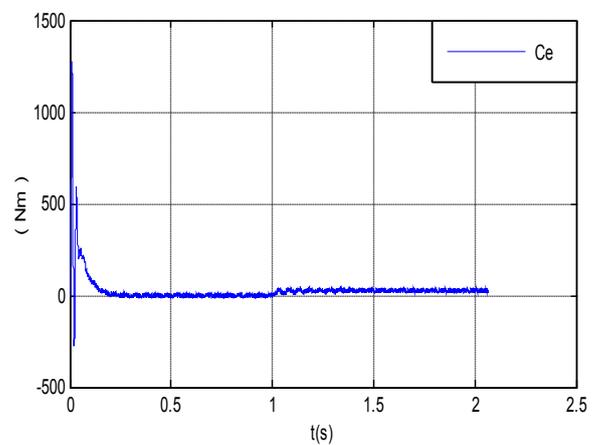


Fig. (II.20). Couple électromagnétique de la MADA alimentée par la **cascade**

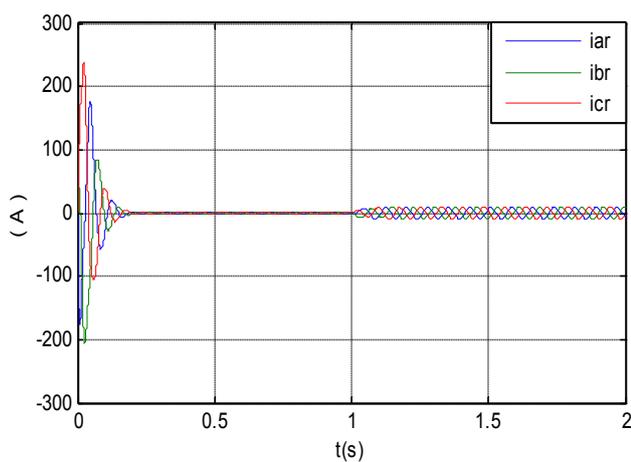


Fig. (II .21). Les Courants rotoriques de la MADA alimentée par le **réseau**

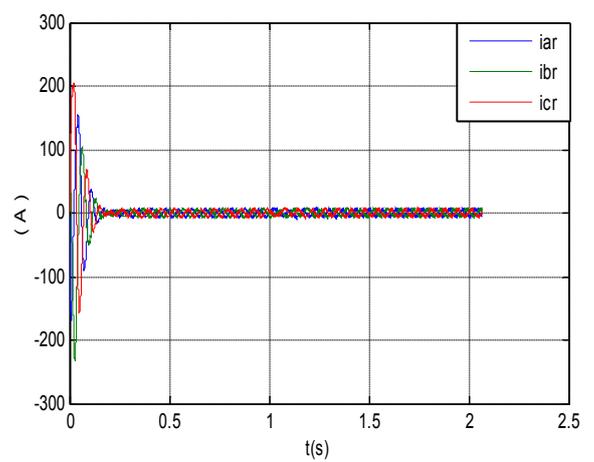


Fig. (II.22). Les Courants rotoriques de la MADA alimentée par la **cascade**

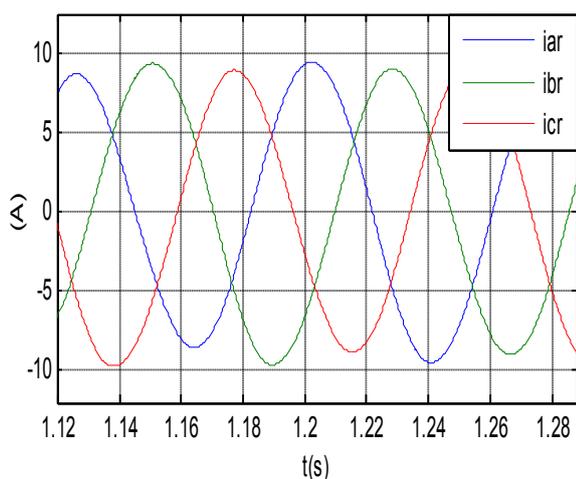


Fig. (II.23) : Les Courants rotoriques MADA alimentée par le **réseau (Zoom)**

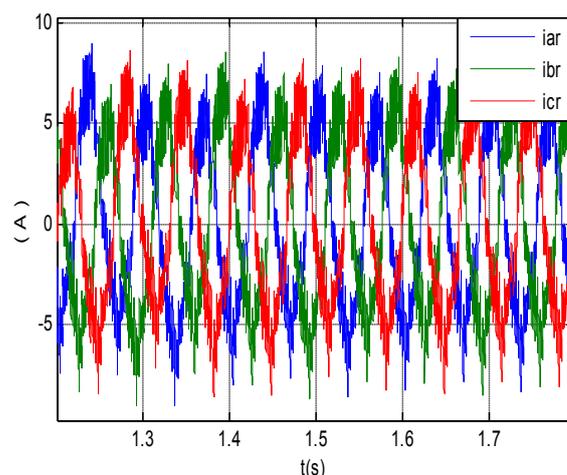


Fig. (II.24) : Les Courants rotoriques MADA alimentée par la **cascade**

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 $C_r = C_{en} = 26 \text{ Nm}$ 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 47 N.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.

II.6. 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-sinusoïdale) 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.

III.1. Introduction

Beaucoup de machines asynchrones à double alimentation sont utilisées dans des situations critiques dans les centrales de production de l'énergie. Une défaillance dans la machine peut causer des dégâts considérables dans l'unité de production. Cependant, de nombreux travaux ont été publiés sur les différents défauts qui causent un déséquilibre. Ses travaux on permet de déterminer les principales causes qui provoquent le déséquilibre. Parmi ces causes, c'est le cas ou une défaillance est due au niveau de la machine.

Dans ce travail nous allons présenter les défauts de la machine qui provoque un déséquilibre. Ensuite, on a étudié les performances d'une MADA alimenté par un réseau déséquilibré. Puis, une analyse spectrale est présentée.

III.2. Définition

Tout écart entre les caractéristiques observées sur le dispositif et les caractéristiques de référence, lorsque celui-ci est en dehors des spécifications. Ou n'importe quel état indésirable d'un composant ou d'un système. Un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance

III.2.1. déséquilibre à cause d'une défaillance de la machine

La machine asynchrone à double alimentation est la plus fiable des machines électriques, la plus robuste de sa génération, la moins coûteuse à la fabrication et la plus utilisable dans la production d'énergie éolienne. Ces propos sont classiquement tenus lors de réunions entre collègues, et amplement répandus dans notre communauté électrotechnicienne. Cependant, il n'est pas exclu qu'il peut y apparaître des défauts tant au niveau du stator que du rotor. Le diagnostic et la détection de défauts mobilisent à ce jour beaucoup de chercheurs dans ce domaine, engendrant au niveau national la mise en place de groupes de travail sur la modélisation et le diagnostic [45] [46]. Les défauts typiques qui causent le déséquilibre des machines asynchrones, de fortes puissances, sont :

- Un défaut au niveau du rotor qui serait une rupture totale ou partielle d'une barre au niveau de l'anneau de la cage d'écureuil, une rupture d'une portion d'anneau,
- Un défaut de contact balai - bague dans le cas d'un rotor bobiné,
- Un défaut d'alignement prononcé par une irrégularité de l'entrefer qui induirait des frottements, donc des préjudices sur le bobinage du stator,
- Une dégradation par usure prématurée ou non des roulements à billes.

- Un défaut d'isolation électrique au niveau du bobinage du stator suite à un vieillissement prématuré du au milieu de fonctionnement hostile ou non et à la façon dont est alimenté le moteur,

Durant maintenant plus d'une vingtaine d'années, des études et des recherches ont été menées sur la façon dont on pourrait détecter une panne, une défaillance et d'y comprendre la relation cause à effet. Ainsi, on pourrait améliorer la fiabilité du moteur asynchrone, donc augmenter sa durée de vie. Il nous faut rappeler que le moteur asynchrone de forte de puissance est utilisé dans différentes applications. D'autre part, on peut détecter d'autres défauts de la machine causée par un déséquilibre du réseau électrique. La figure (III.1) regroupe les différentes causes qui provoquent un déséquilibre :

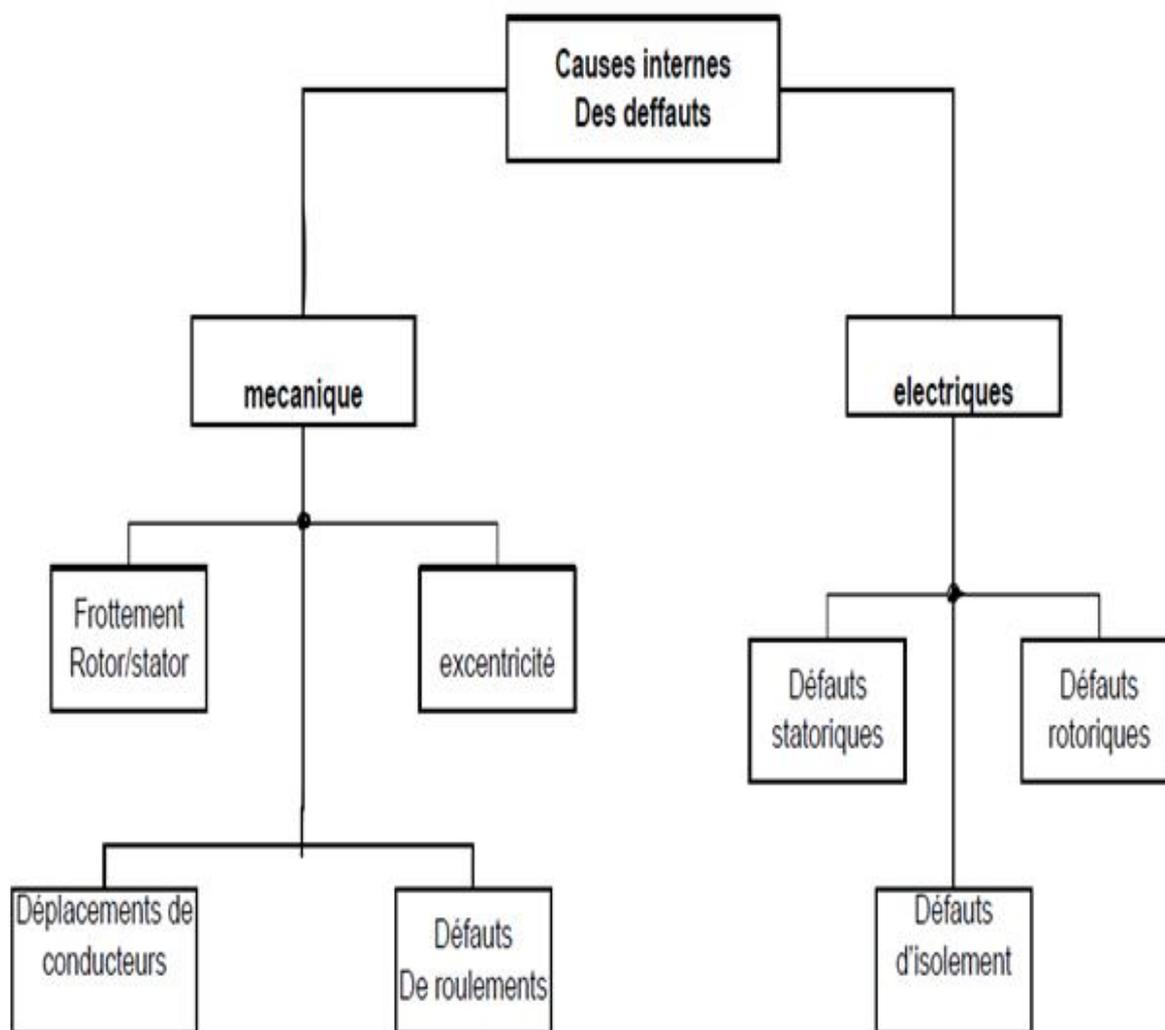


Figure. (III. 1). Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

Non seulement, les causes internes et les défaillances qui influent sur le comportement de la machine, il y a aussi des autres causes qui sont externe

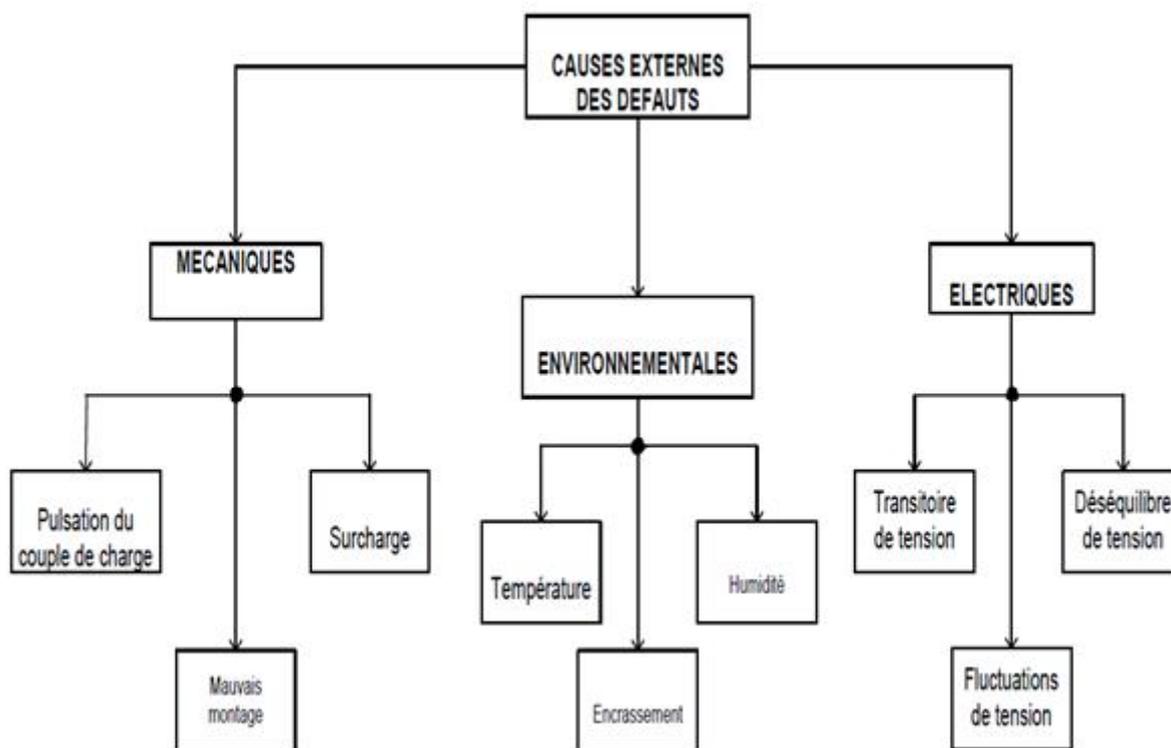


Figure. (III.2) : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée

Le diagramme ci-dessus exprime les différentes causes externes qui provoquent un déséquilibre, parmi ses causes on observe la présence du déséquilibre de tension. Ce déséquilibre est dû au niveau de réseau qui alimente la machine.

III.2.2. déséquilibre à cause d'un défaut au niveau de réseau

Les études de défauts constituent une partie très importante dans l'analyse d'écoulement de puissance des réseaux électriques, ce sont les études où les niveaux de courant de défaut, les puissances de court-circuit (tension avant le défaut que multiplie le courant de défaut) et les tensions après défaut sont calculées. D'autres quantités, peuvent également être calculées.

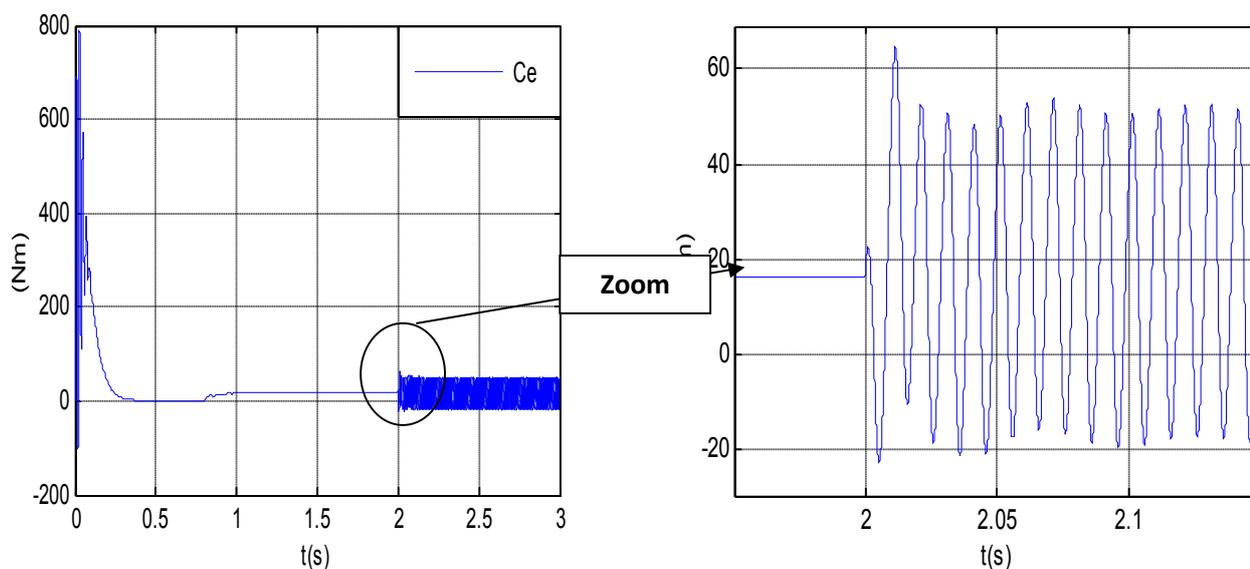
Les défauts pour lesquels un réseau est dit déséquilibré peuvent être subdivisés en deux catégories : Défauts à court termes et défauts à long termes ; les défauts à court termes sont les défauts (monophasé terre ; biphasé, biphasé terre et la combinaison de ces défauts), ainsi que l'ouverture d'une phase ou l'auto fermeture d'une autre ; ce sont des perturbations

temporaires. Tandis que la deuxième catégorie comprend des déséquilibres permanents qui sont dus à la non transposition des lignes, un mal fonctionnement d'une phase (de la protection), ou encore la présence d'une charge déséquilibrée

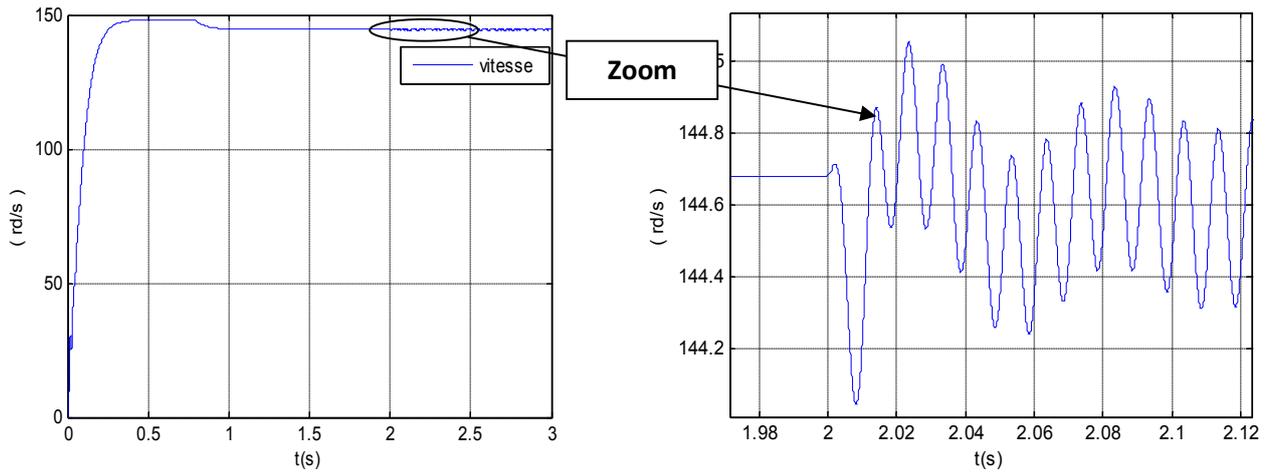
Dans le cas de notre travail on s'intéresse essentiellement a une étude sur les performances de la MADA lorsqu'elle est alimenté par un réseau déséquilibré, on effectuant une expérience basé sur dégradation de la tension

III.3 Les résultats de simulation

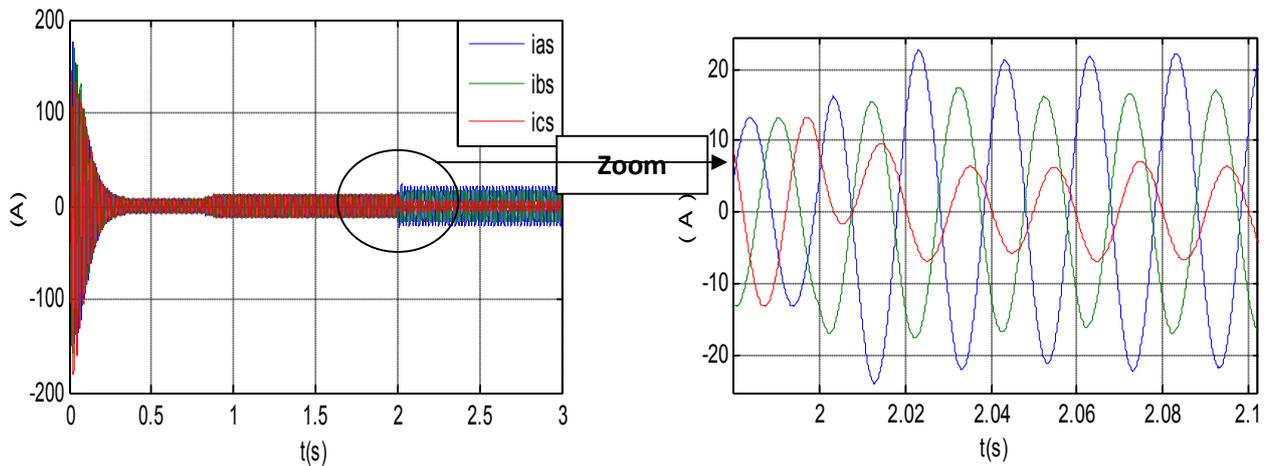
La simulation a été effectuée par le logiciel MATLAB, dans cette partie on à présenté le cas d'une MADA alimenté par un réseau déséquilibré. Nous avons effectué un test pour une augmentation de tension (15%) au niveau de la première phase V_{a_s} , et une chute (15%) au niveau de la troisième phase V_{c_s} . les résultats sont dans les figures suivant.



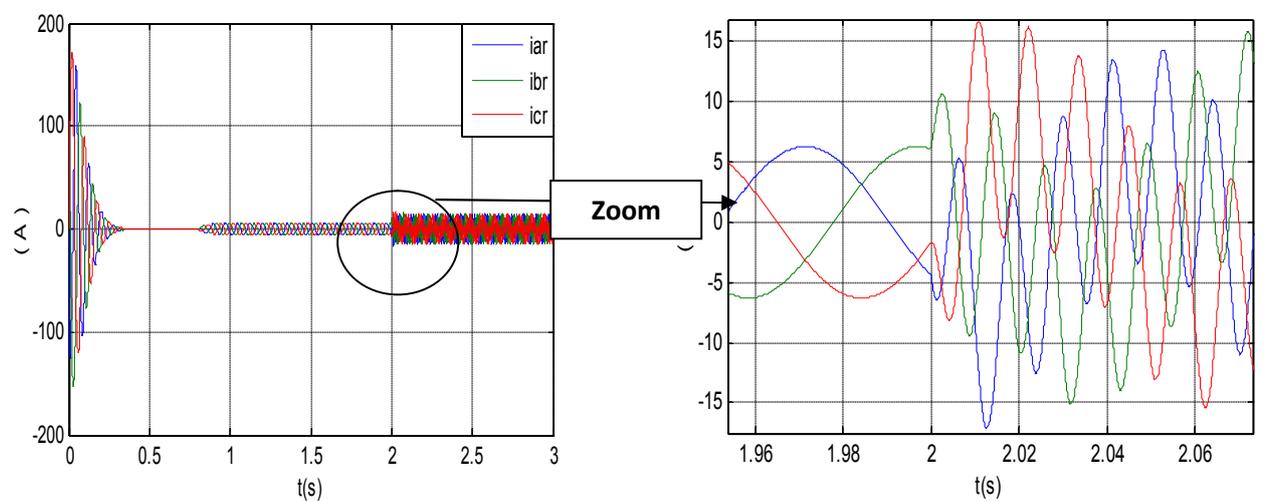
a. Couple électromagnétique



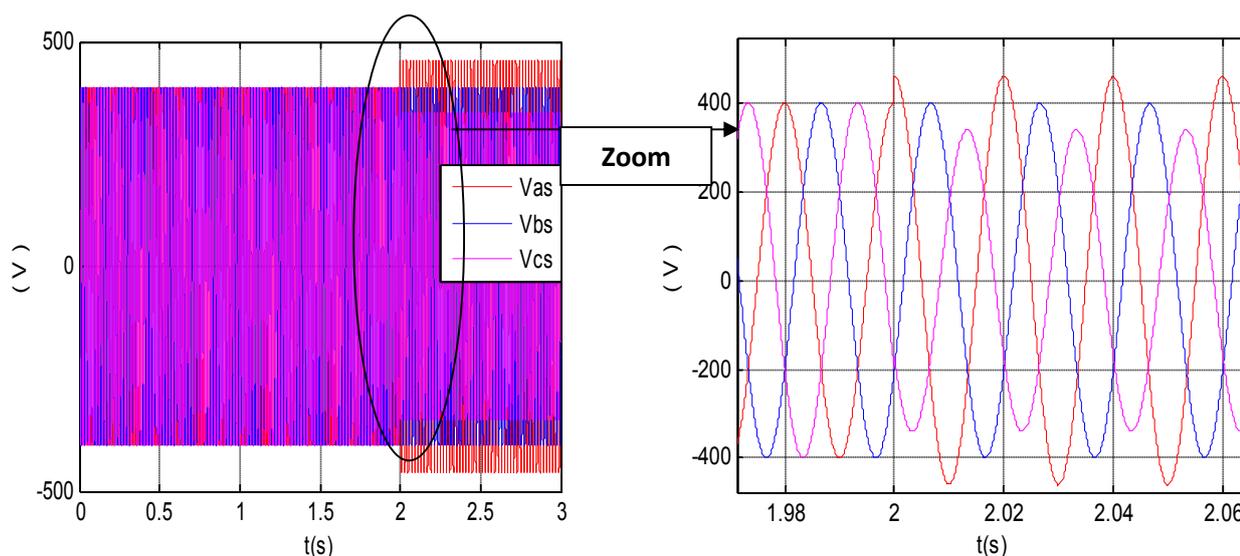
b. Comportement de la vitesse de rotation



c. Courant statoriques



d. Courant rotoriques



e. Tension statoriques

Fig. (III.3). Evolution des grandeurs électromécaniques en régime de déséquilibre

Interprétation

On remarque à l'instant $t = 2$ sec, une apparition d'un défaut (déséquilibre) au niveau de deux phases :

- Une surtension de 15% au niveau de la première phase V_{as}
- Aucun changement à la deuxième phase V_{bs}
- Une chute de 15% au niveau de la troisième phase V_{cs}

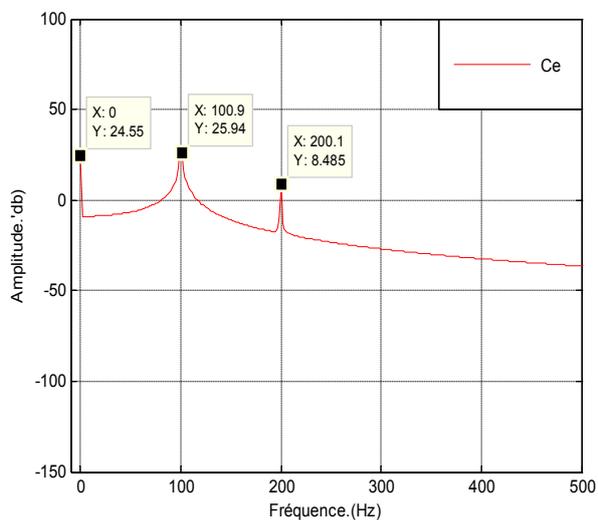
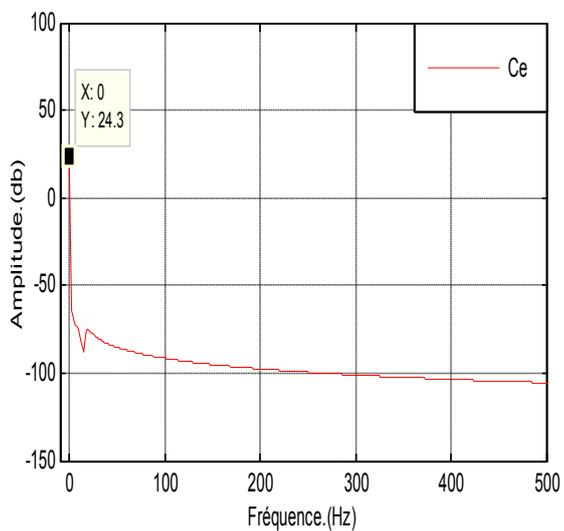
On remarque aussi, que les signaux du couple électromagnétique sont oscillatoires dès l'apparition du défaut, le couple et la vitesse de la machine sont influent par le défaut. L'amplitude des oscillations dépend de l'ampleur de défaut (%)

III.4. Analyse spectrale

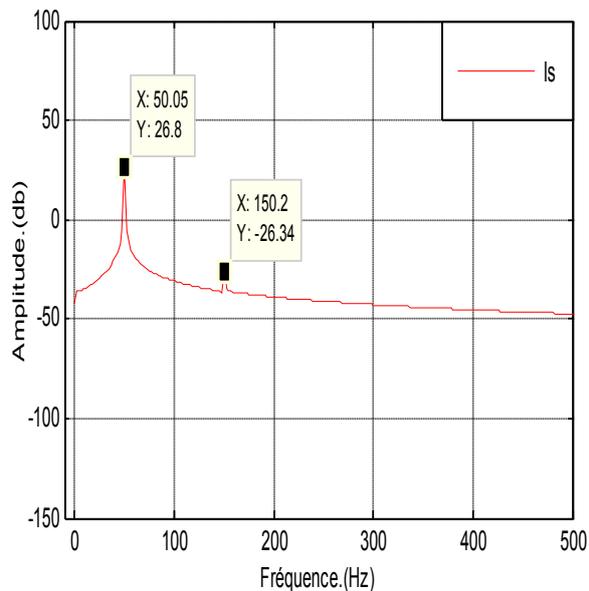
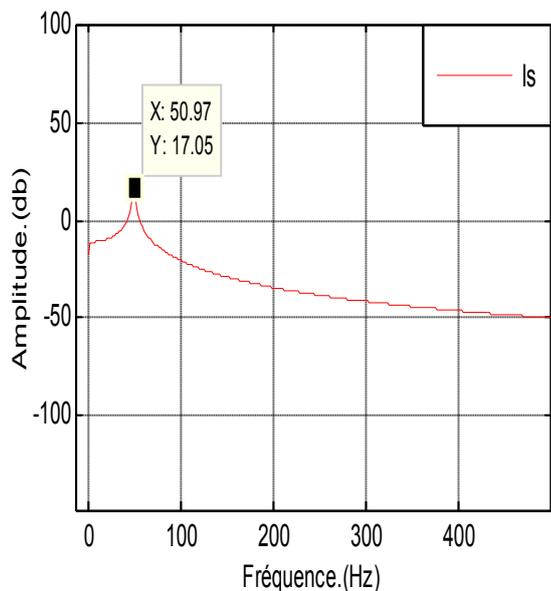
Il est parfois difficile de se contenter uniquement sur les résultats obtenus précédemment pour détecter un défaut. Des méthodes basées sur l'analyse spectrale des signaux constituent meilleur outil permettant d'appréhender les défauts. L'analyse des grandeurs électromagnétique dans le domaine fréquentiel est la plus utilisée car le spectre rend compte sur l'existence des défauts dans une machine électrique. A travers les différents relevés relatifs aux spectres couple, vitesse et courants statoriques, nous sélectionnons la grandeur qui fournit plus d'information sur l'état de la machine.

III.5. Résultats de simulation (FFT)

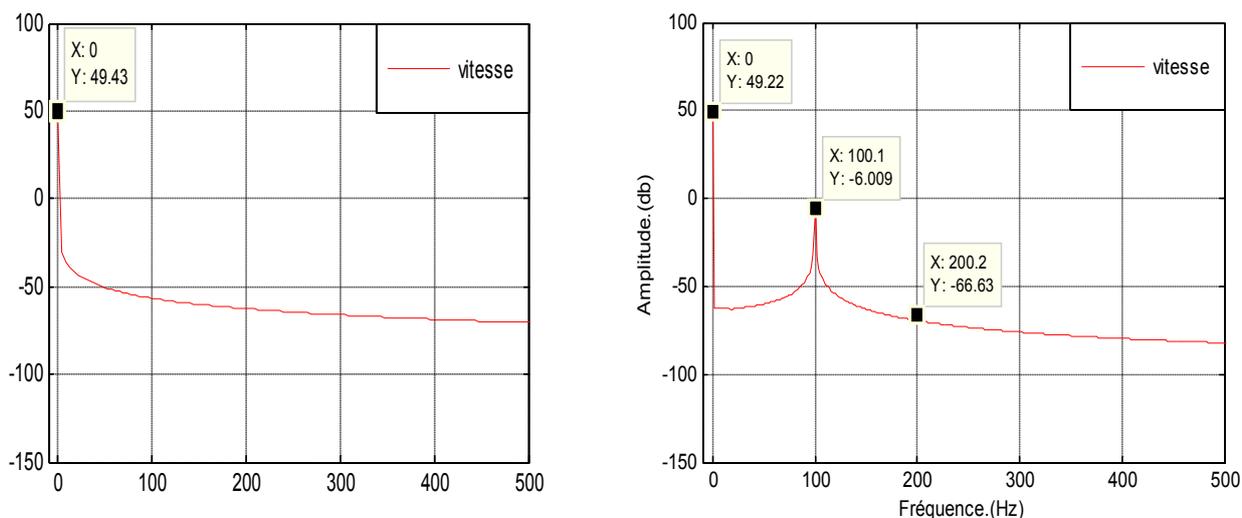
La figure (III.2) représente respectivement les spectres relatifs du couple, courant statorique et la vitesse en régime permanent, lors de la présence d'un déséquilibre.



Fenêtre de couple (réseau équilibré) Fenêtre de couple (réseau déséquilibré)



Fenêtre du courant (réseau équilibré) Fenêtre du courant (réseau déséquilibré)



Fenêtre de vitesse (réseau équilibré) Fenêtre de vitesse (réseau déséquilibré)

Fig. (III.4) : Le FFT de la Machine asynchrone à double alimentation sans et avec déséquilibre

Interprétation

Après une analyse spectrale aux couple, vitesse et courants statoriques en régime permanent, avec et sans déséquilibre.

Nous relevons une apparition des raies de fréquences introduits par le défaut aux niveaux de la vitesse ($f_1 = 100 \text{ Hz}$, $f_2 = 200 \text{ Hz}$) et au niveau du couple ($f_1 = 100 \text{ Hz}$, $f_2 = 200 \text{ Hz}$), on remarque aussi une apparition des harmoniques ($f_2 = 150 \text{ Hz}$) au niveau du courant statorique après la première harmonique (fondamentale $f_1 = 50 \text{ Hz}$) qu'on l'observe en mode sain.

Cette étude à montrer que le déséquilibre rend compte de la création d'harmoniques dues à l'apparition d'un défaut au réseau qui alimente la machine.

III.6.CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié le comportement d'une MADA alimenté par un réseau déséquilibré, L'étude analytique a montré que le défaut provoque des influences sur les grandeurs électromagnétiques de cette machine. L'évaluation des harmoniques ont montré clairement que les amplitudes de ces dernières sont très influencées.

IV.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 en régime sain et déséquilibré on 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.

IV.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 .

IV.3. Hypothèse 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'aire (db) 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.

IV.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]:

$$V(t) = V_0 + VT(t) \quad (\text{IV.1})$$

Une composante turbulente du vent $VT(t)$ 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.

IV.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] :

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

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:

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

S : La surface balayée par l'éolienne.

ρ : La masse volumique de l'air ($1.25 \text{ kg} / \text{m}^3$).

V : La vitesse du vent par ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

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

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

IV.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 :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V} \quad (IV.5)$$

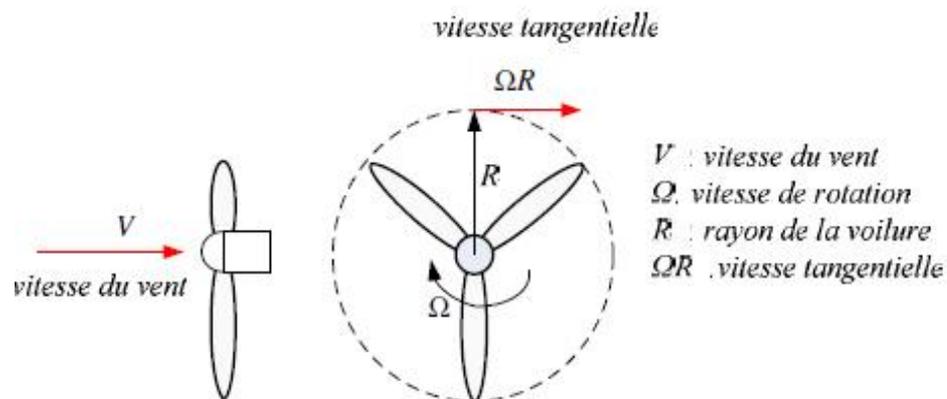


Figure (IV.1). Vitesse du vent V et la vitesse tangentielle (ΩR)

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 suivante [58] :

$$C_p = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (IV.6)$$

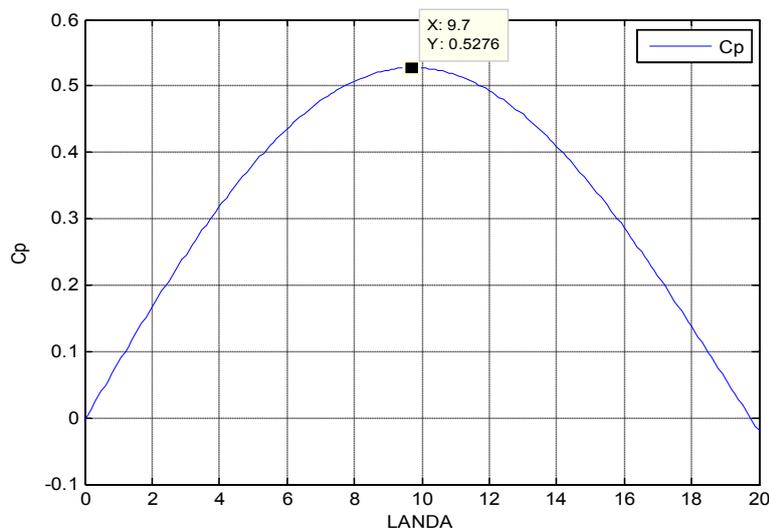


Figure (IV.2). Caractéristique de la turbine éolienne

La caractéristique de la turbine éolienne de la figure (IV.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 optimal.

Ce point optimal, dans notre cas, ou on a pris une turbine tripale d'un rayon de 2.4 m est donnée par :

$$\begin{cases} C_p^{opt} = 0.5483 \\ \lambda^{opt} = 6.41 \end{cases} \quad (\text{IV. 7})$$

IV.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 Ω_{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 (IV.4) et dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, a déjà été vérifiée [58].

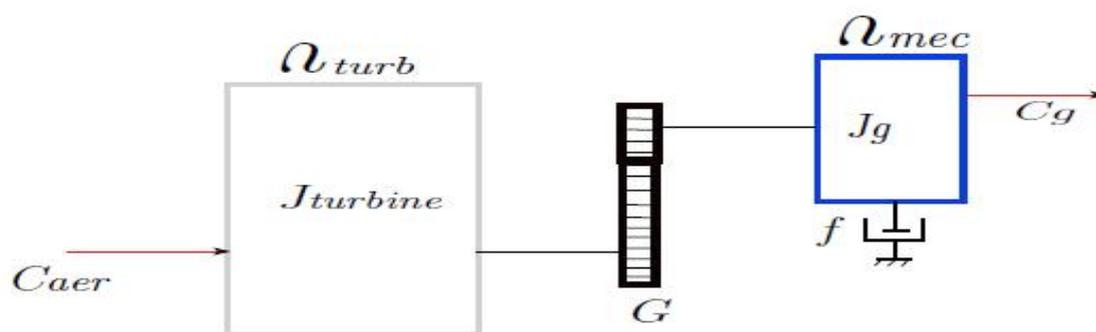


Figure (IV.3). Modèle mécanique de la turbine éolienne.

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 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.

IV.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} tel que :

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_{trb} \quad (IV.8)$$

Où G représente le gain du multiplicateur.

Aussi, le couple C_g généré sur l'arbre qui entraîne la génératrice est lié au couple aérodynamique C_{aer} par:

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (IV.9)$$

IV.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.

$$J = \frac{J_{trb}}{G^2} + J_g \quad (IV.10)$$

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum C_i = C_{mec} \quad (IV.11)$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{vis} + C_{em} \quad (IV.12)$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (IV.13)$$

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

$$C_g - C_{em} = \left(\frac{J_{trb}}{G^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (IV.14)$$

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

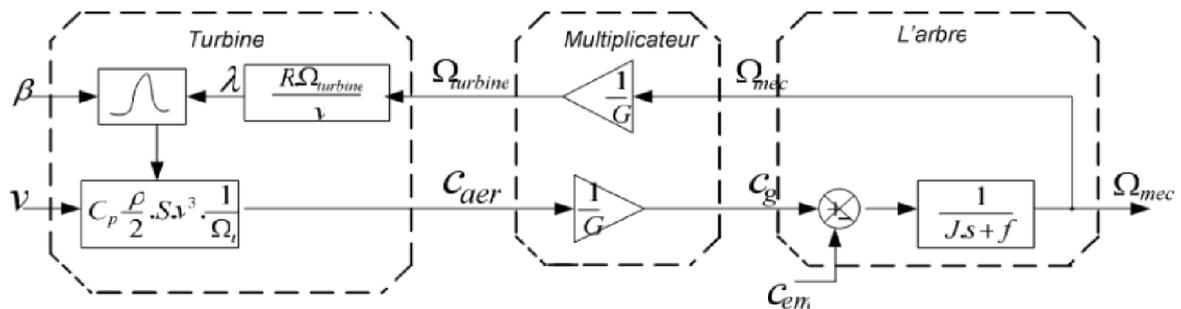


Figure (IV.4). Le schéma bloc du modèle de la turbine

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 (IV.8), (IV.9).

Le modèle de l'arbre décrit 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.

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

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

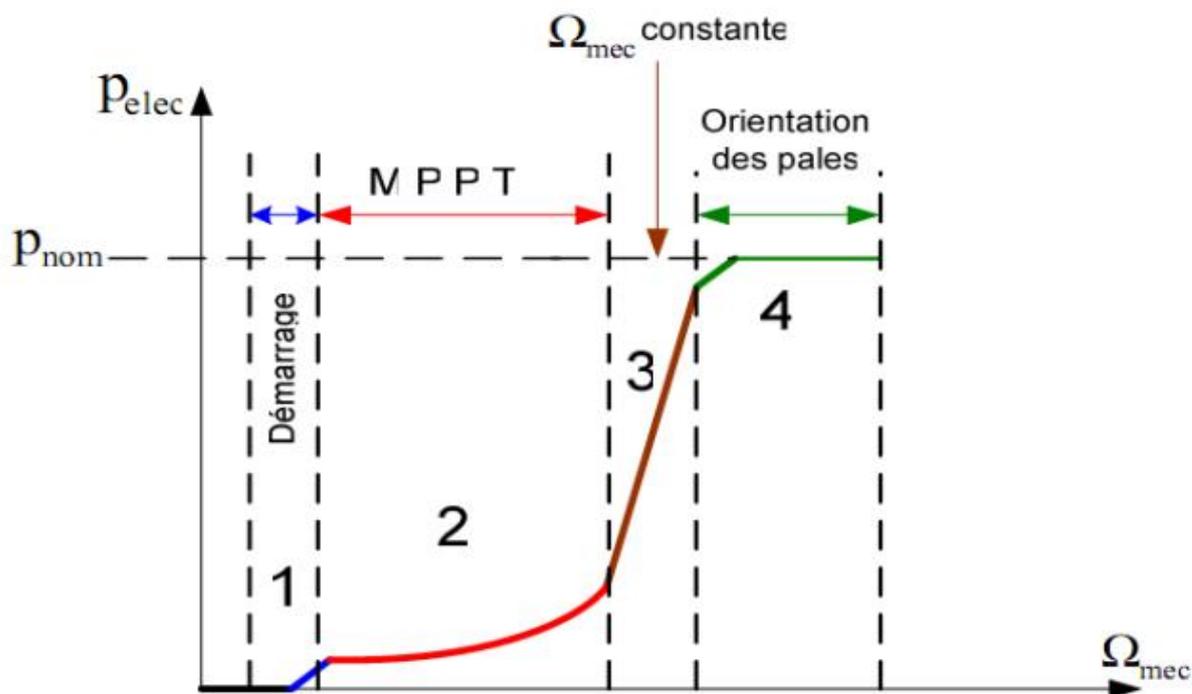


Figure (IV.5). Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance

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.

IV.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.

$$C_{em} = C_{em\ ref} \quad (IV.15)$$

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} .

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

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 :

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

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 :

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

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

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

IV.4. Commande vectorielle par la puissance active et réactive

IV.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

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - w_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + w_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (w_s - w) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (w_s - w) \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (IV.20)$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ \frac{J}{p} \frac{dw_m}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \end{array} \right.$$

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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{ds} - w_s \Phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{qs} - w_s \Phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} + (w_s - w) i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{ds} - \beta \cdot w \Phi_{qs} - \beta V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - (w_s - w) i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{qs} + \beta \cdot w \Phi_{ds} - \beta V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{qr} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{p\mu}{J} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} w \end{array} \right. \quad (IV.21)$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_s = \frac{R_s}{L_s} \\ \sigma_r = L_r \cdot \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \\ \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{L_s^2 \sigma_r} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \beta = \frac{M}{L_s \sigma_r} \\ \mu = \frac{3M}{2L_s} \end{array} \right.$$

IV.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 :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s, \quad \Phi_{qs} = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + w_s \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (w_s - w) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (w_s - w) \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (IV.22)$$

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

$$V_{ns} = R_s \cdot i_{ns} + \frac{d}{dt} \Phi_{ns} \quad (IV.23)$$

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 :

$$V_{ns} = \frac{d}{dt} \Phi_{ns} \quad (IV.24)$$

Cette relation montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur de tension statorique et qu'il est en avance de $(\pi / 2)$ sur ce même vecteur.

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

$$V_{ds} = 0, \quad V_{qs} = V_s \quad (IV.25)$$

Le principe d'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la Figure (IV.16)

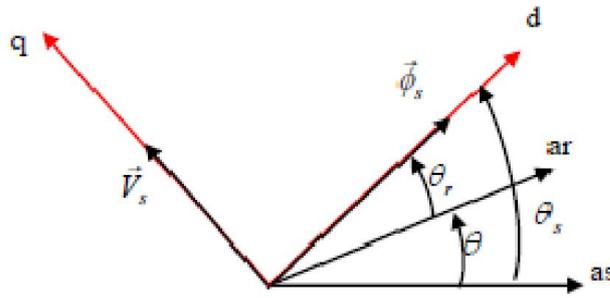


Figure (IV.6). Orientation du flux statorique

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 :

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

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

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (IV. 27)$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (IV. 28)$$

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

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = - \frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (IV. 29)$$

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

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (IV. 30)$$

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

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot i_{ds} \end{cases} \quad (IV.31)$$

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

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\Phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (IV.32)$$

En tirant ($\Phi_s = V_s / \omega_s$) de l'équation (IV.21), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} i_{dr} \quad (IV.33)$$

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 i_{qr} . La puissance réactive peut être commandée par la composante directe du courant i_{dr} .

On considère les tensions rotoriques V_{dr}, V_{qr} comme variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques i_{dr}, i_{qr} comme variables d'état. Ces grandeurs sont en fonction des grandeurs de consigne et P_{sref}, Q_{sref} .

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\Phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (IV.34)$$

Les équations des flux

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (IV.35)$$

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

$$\begin{cases} \Phi_s = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \Phi_s = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (IV.36)$$

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

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

V_{dr} et 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.

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ Est le terme de couplage entre les deux axes ; $g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr}$ 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 (IV.31) et (IV.30), on peut établir le schéma bloc de la Figure (IV.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.

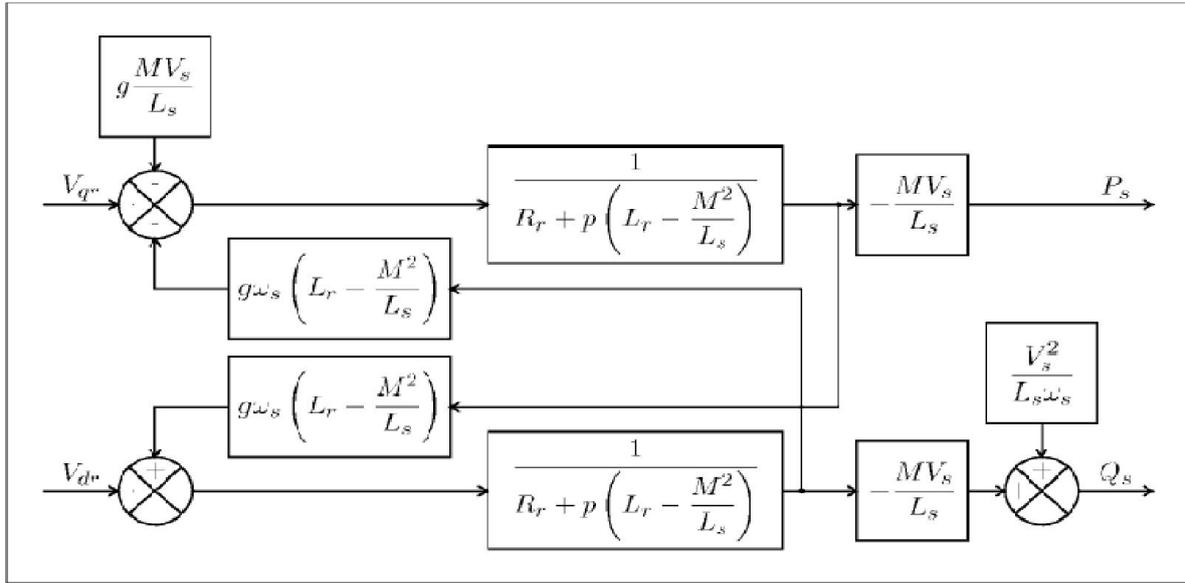


Figure (IV.7). Schéma bloc de la MADA.

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.

IV.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} .

IV.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 un réseau de forte puissance et stable, 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 (IV.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 (IV.8).

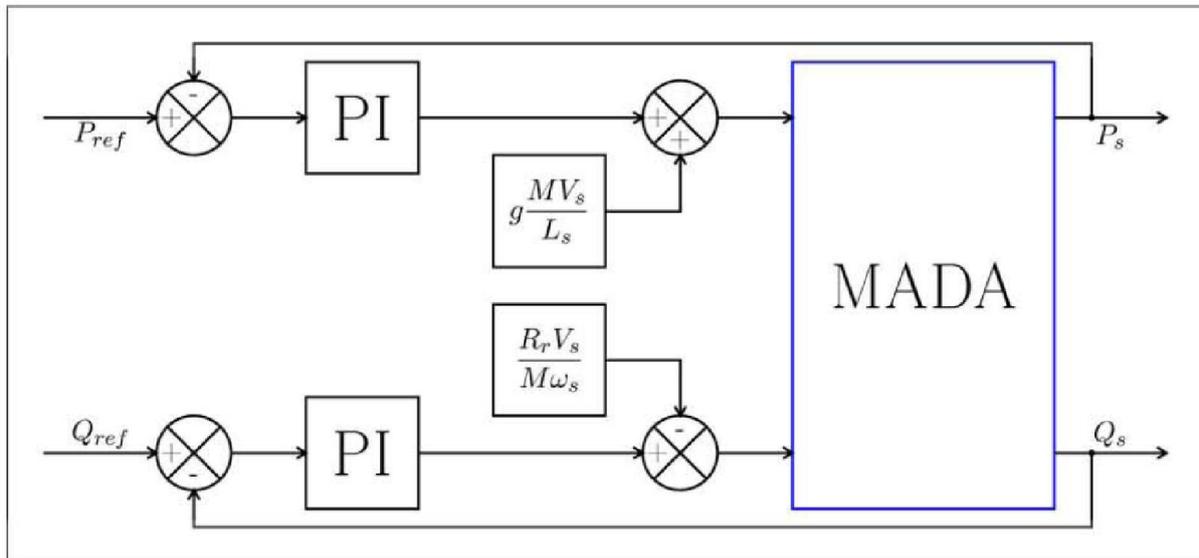


Figure (IV.8). Schéma bloc de la commande directe.

IV.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 :

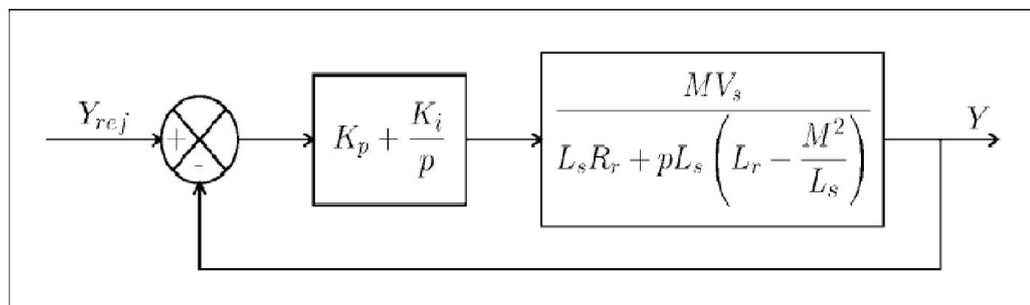


Figure (IV.9): Système régulé par un PI

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (IV.38)$$

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 :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (IV.39)$$

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 :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (IV.40)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \text{ avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (IV.41)$$

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 :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s R_r}{MV_s} \tag{IV.42}$$

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 (IV.10) représente la structure globale d'une chaîne de conversion d'énergie

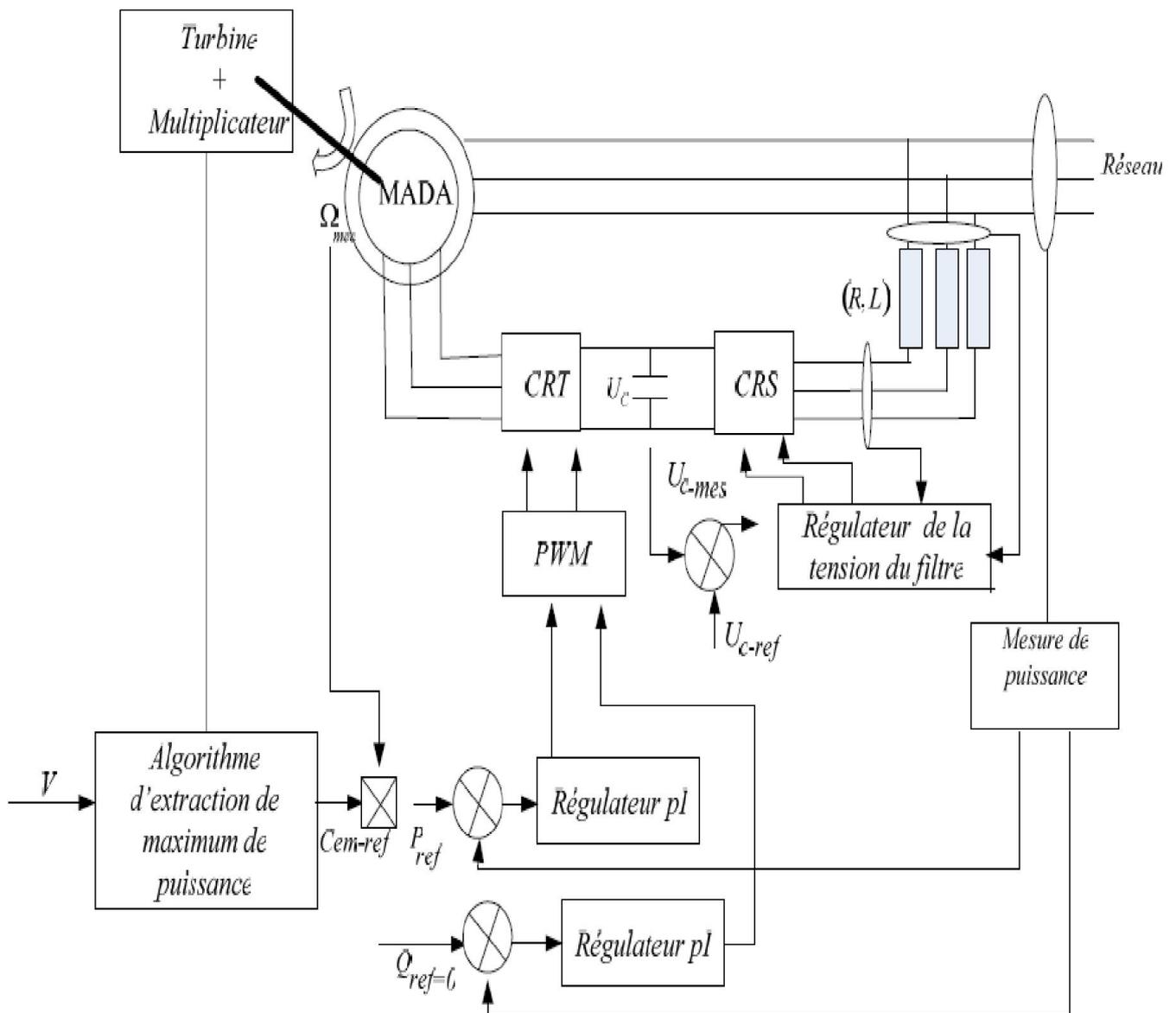


Figure (IV.10) : Schéma structurel du système éolien global

IV.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 400 V et d'une fréquence de 50 Hz. Les résultats de simulation de toute la chaîne éolienne sont représentés sur les figures ci-dessous.

IV.5.1. Réseau équilibré (sain)

Nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles telles que les courants statorique et rotorique, la puissance active et réactive statorique de la MADA lorsque le réseau est équilibré.

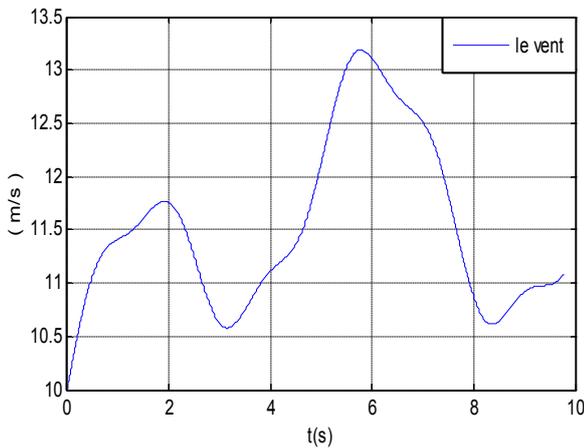


Fig. (IV.11). Le profil du vent

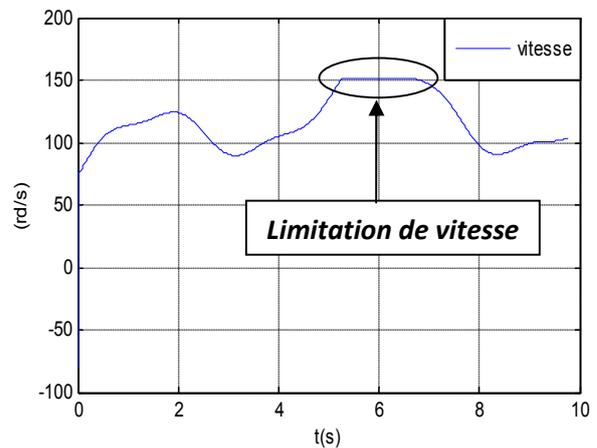


Fig. (IV.12) La vitesse de rotation

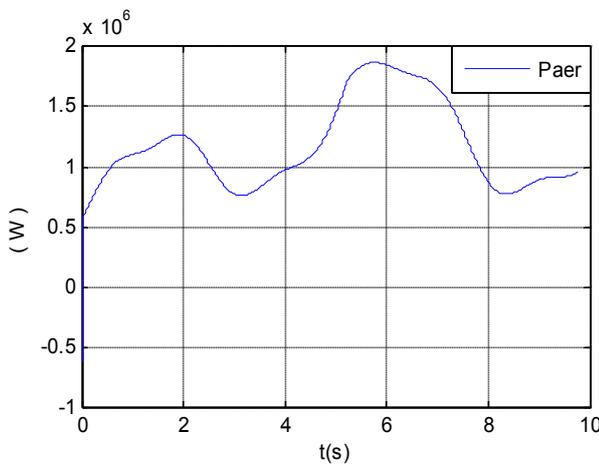


Fig. (IV.13) La puissance aérodynamique

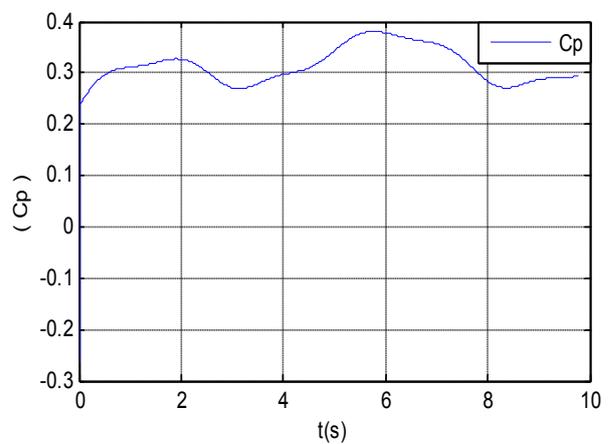


Fig. (IV.14) Le facteur de puissance

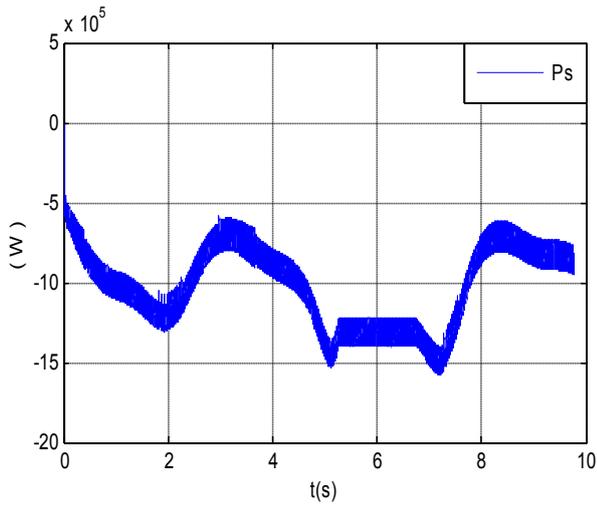


Fig. (IV.15) : La puissance active statorique

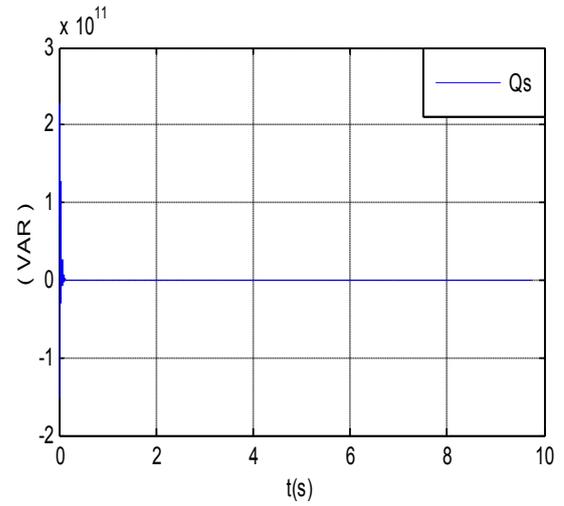


Fig. (IV.16) : La puissance réactive statorique

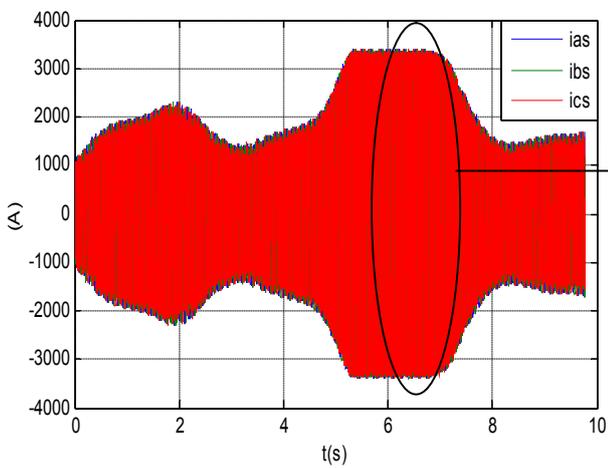


Fig. (IV.17) Courants statorique

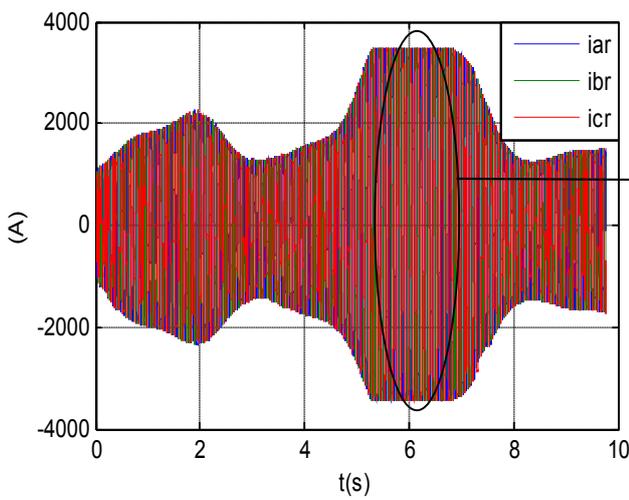
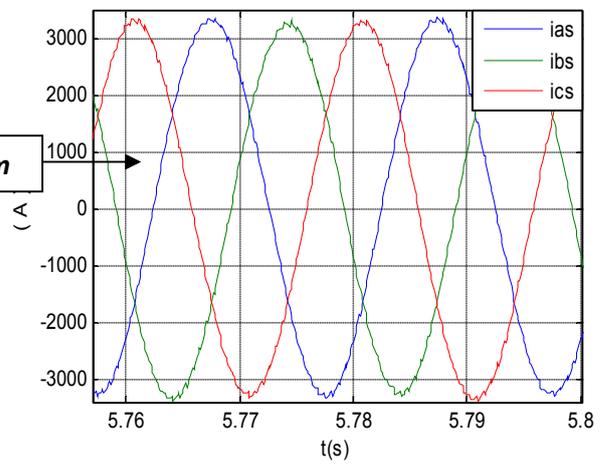
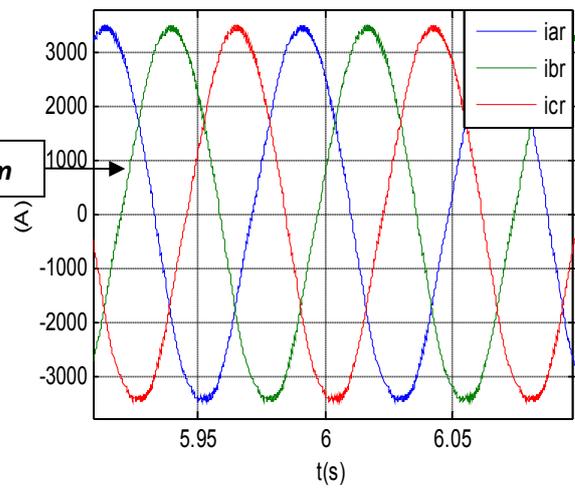


Fig. (IV.18) courants rotorique



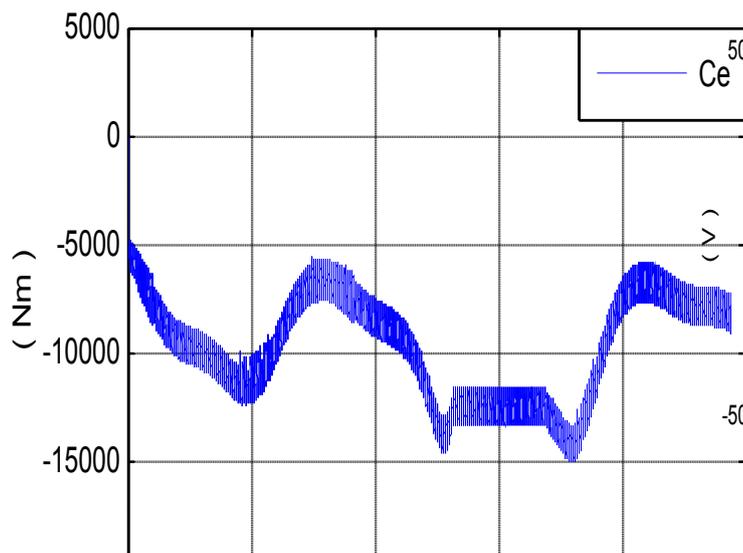


Fig. (IV.19) Couple électromagnétique

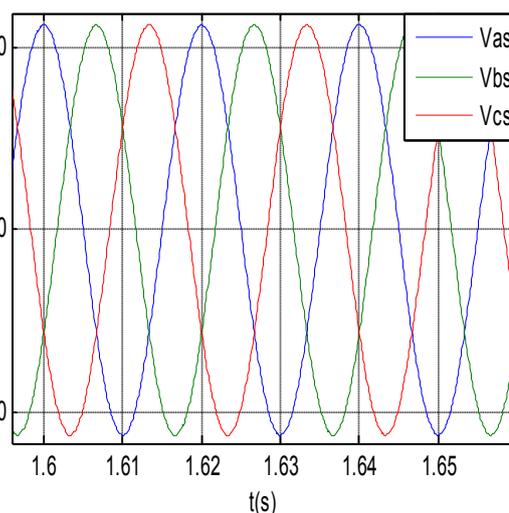


Fig. (IV.20) tensions statorique

Interprétation

La Figure (IV.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 figure (IV.15) est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice figure (IV.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. La Figure (IV.15) montre que La puissance active statorique est négative signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA et La puissance réactive est nulle, c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire. Le couple électromagnétique de la génératrice varie selon celui de la turbine qui est l'image de la vitesse du vent.

La Figure (IV.17) et Figure (IV.18) présente la variation de l'amplitude du courant statorique et rotorique en fonction de la vitesse de rotation, finalement on déduit que toutes les grandeurs électromécaniques prennent une forme du profil du vent.

IV.5.2. Réseau déséquilibré

Les figures ci-dessous présentent les grandeurs électromagnétiques lorsque la MADA est alimenté par un réseau déséquilibré :

- Surtension de 25% au niveau de la première phase ;
- Chute de 25% au niveau de la deuxième phase.

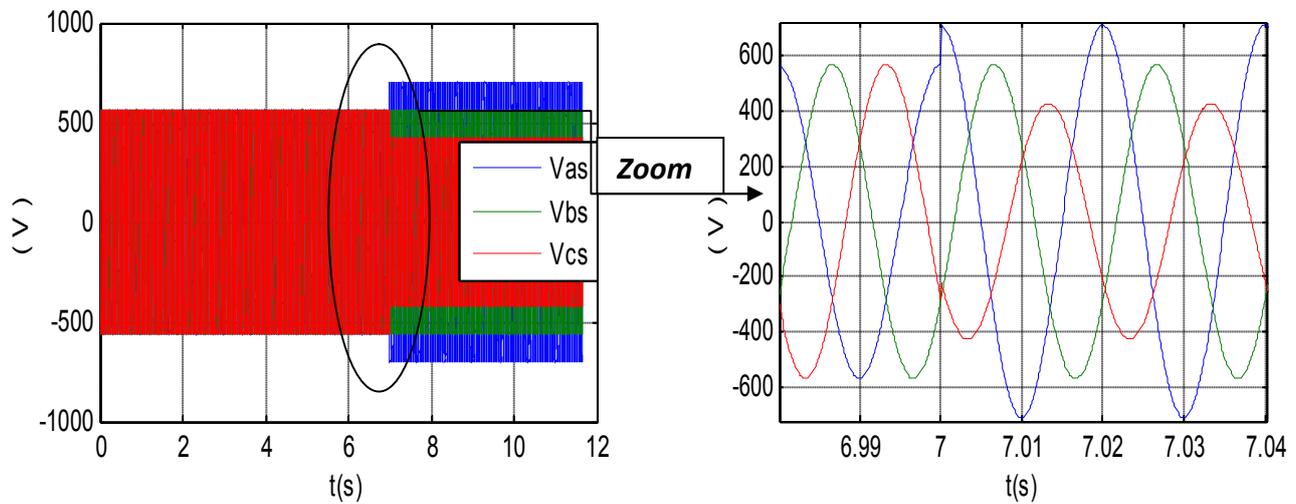


Fig. (IV.21): tension statorique en présence d'un déséquilibre

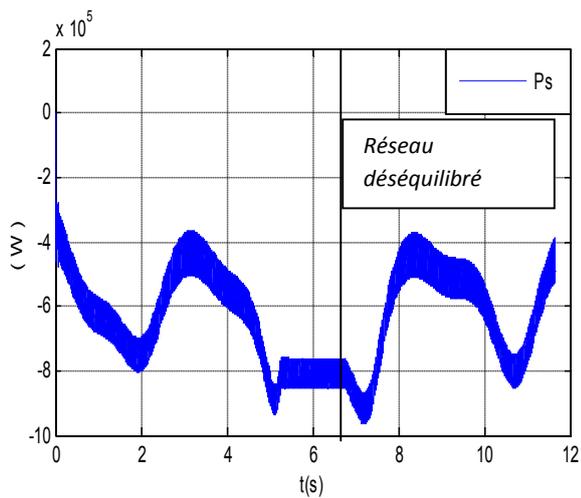


Fig. (IV.22): la puissance active statorique en présence d'un déséquilibre

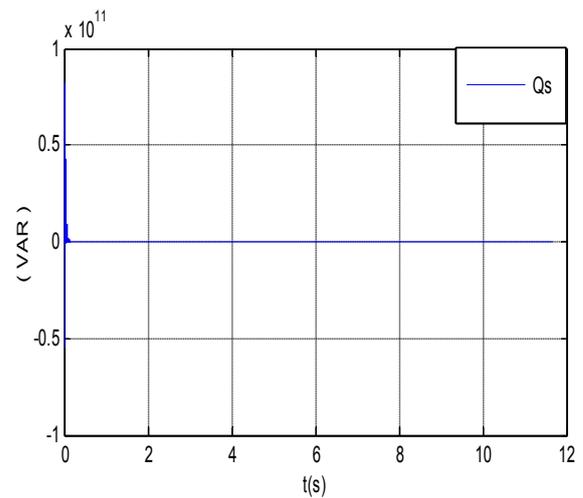


Fig. (IV.23) : la puissance réactive en présence d'un déséquilibre

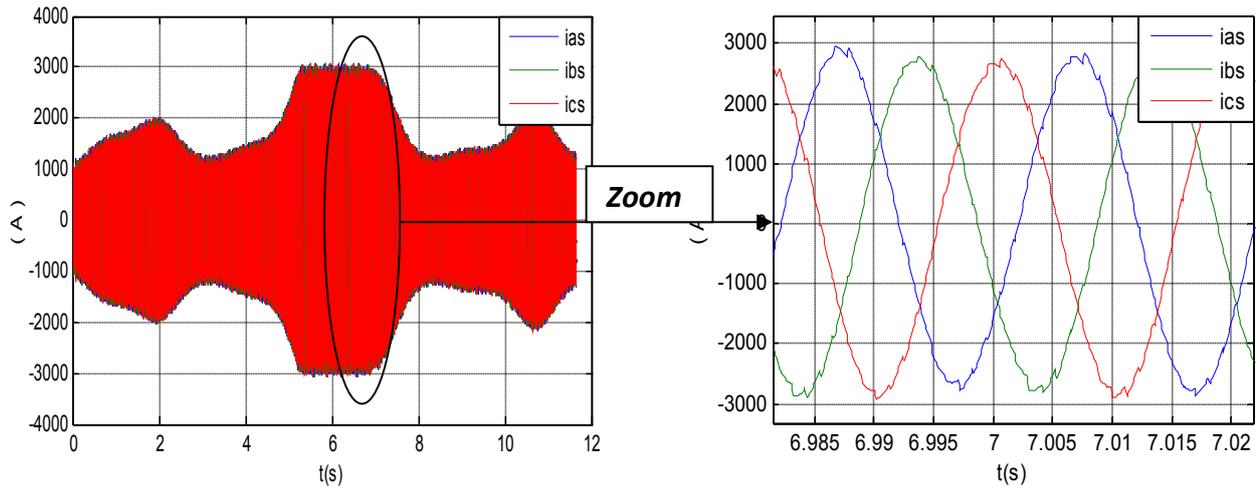


Fig. (IV.24): courants statorique en présence d'un déséquilibre

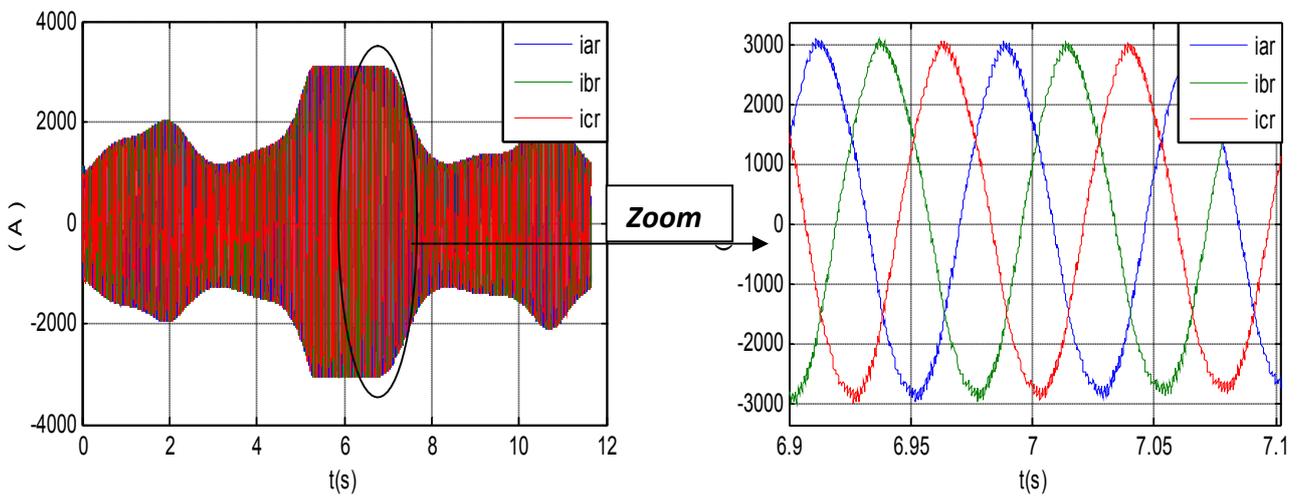


Fig. (IV.25): courants rotorique en présence d'un déséquilibre

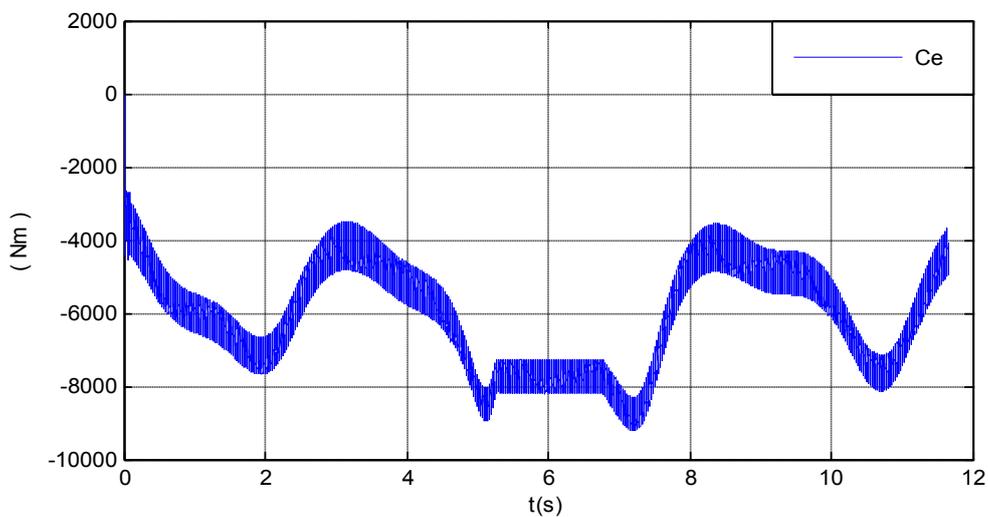


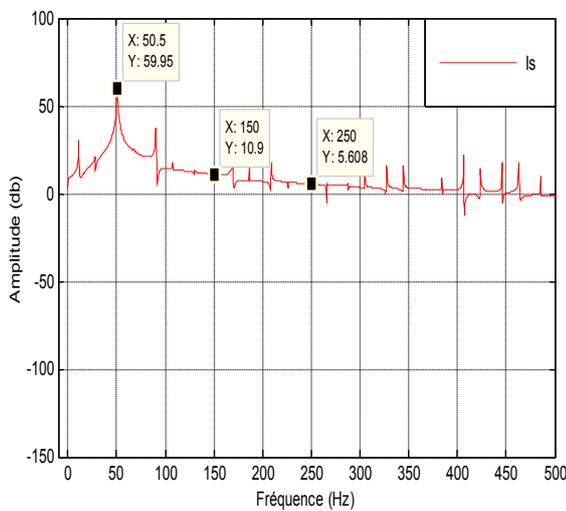
Fig. (IV.26): couple électromagnétique en présence d'un déséquilibre

Interprétation

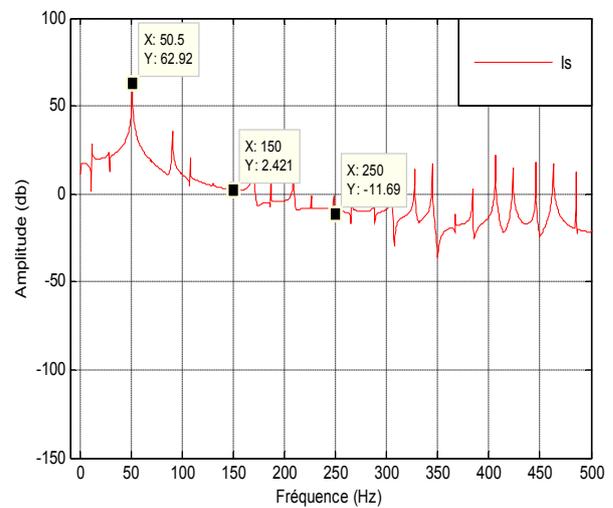
L'analyse des figures précédentes montre que l'influence du déséquilibre sur les performances de la chaîne est inaperçue, lorsque la machine est de grande puissance. Ce qui nous a amené à traiter les résultats par la transformée de Fourier rapide (FFT).

IV.5.3. Résultat avec analyse spectral par FFT

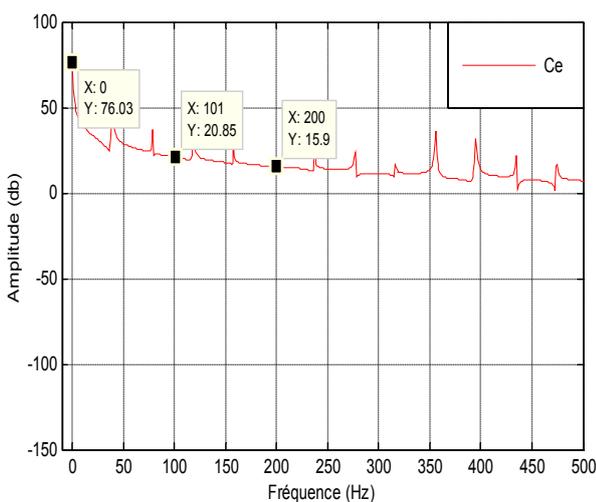
L'objectif de cette partie consiste à identifier les signatures fréquentielles de courants statoriques et de couple électromagnétique causé par le déséquilibre.



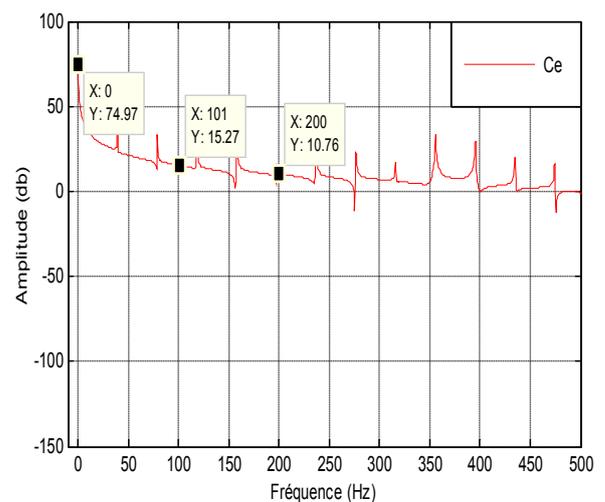
Fenêtre du courant (réseau équilibré)



Fenêtre du courant (réseau déséquilibré)



Fenêtre de vitesse (réseau équilibré)



Fenêtre de vitesse (réseau déséquilibré)

Fig. (IV.27). Le FFT de la MADA en régime sain et avec déséquilibre

Interprétation

Chaque ampleur de déséquilibre laisse une signature sur le spectre du courant statorique et le couple électromagnétique qui se traduit par l'apparition des raies latérales autour de la fréquence fondamentale. On observe sur les figures (fft is .fft Ce) une augmentation de [62 dB] sur la raie [50 Hz] et une augmentation de [74 dB] sur la raie de [0 Hz]. On remarque aussi, une augmentation sur les autres raies de spectre au niveau du couple et courant lors d'un déséquilibre. Ses raies sont dues à cause de la variation et l'influence du vent sur les grandeurs électromagnétiques.

IV.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 différents régimes de fonctionnement sain et défaillants. On a trouvé que le déséquilibre influe sur les courants statoriques qui influent sur la puissance active statorique. Les variations des grandeurs ne sont pas remarquables pour le domaine temporel ce qui nous a amené à les traiter sur le domaine fréquentiel en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT), cette approche nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par le déséquilibre.

Conclusion générale

L'objectif préalablement défini de ce travail consistait à l'analyse des performances d'une chaîne éolienne. A la lumière de l'étude effectuée, nous avons vu l'effet de déséquilibre sur les grandeurs électromagnétiques.

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.

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 est consacré à une étude sur le déséquilibre d'un réseau d'une manière générale, nous avons cité quelques défauts qui provoquent le déséquilibre. Puis, on a présenté un modèle d'une MADA alimenté par un réseau déséquilibré. Les résultats de simulation de ce modèle sur MATLAB ont été présentés et discutés.

Dans le quatrième chapitre nous avons établi une analyse des performances d'une chaîne éolienne en régime déséquilibré. Une modélisation nous a permis de simuler son comportement en régime équilibré et déséquilibré, on suppose que la vitesse du vent varie légèrement au 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 (la MADA est intégrée dans un système éolien). Dans cette partie, nous avons présenté une étude théorique dans laquelle nous avons exprimé les puissances active et réactive statoriques en fonction des courants rotoriques. A la fin de ce chapitre on a simulé et analysé le modèle de la chaîne de conversion d'énergie éolienne en régime déséquilibré. 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. Et nous avons montré l'influence de déséquilibre sur les performances de la chaîne éolienne.

إهداء

أهدي هذا العمل إلى:

مع كل الإحترام و العرفان إلى أئلى إنسانين فى العالم
أمى وأبى العزىزىن.

إلى جدى و جدتى

إلى أخواتى:

سعىة, محمد, طارق, حىاة و خولة

إلى كل العائلة بوخاتم.

إلى أئلى الأصدقاء فى العالم:

فاروق, عبءالاله, عبءالرحمان, عىقة و ىزىء.

إلى كل أصدقائى.

إلى كل من هو عزىز على.

سشام بوخاتم



DEDICACE

Je dédie ce modeste mémoire :

A mes parents, qui ont toujours cru en moi et qui m'ont accompagné moralement tout au long de ce parcours. L'éducation, soin et conseils qu'ils m'ont prodigués, m'ont toujours guidé pour faire les bons choix dans ma vie, que grâce à Allah puis à leurs soutien, encouragement et prières, rien n'aurait été possible.

A ma sœur et ces enfants,

A mes frères,

A mes petits frères FADI et KENZI,

A toute ma famille "MAIDI "et "FELLAH",

A toute la famille "BELLAMECHE",

A mes enseignants,

A mes amis,

A mes camarades de classe,

A toutes les personnes qui m'ont aidé durant le Parcours de ma formation.

*MAIDI
ABDELILLEH*



Introduction générale

La consommation d'énergie, au cours de ces dernières années, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive et la consommation domestique excessive. Le recourt, des pays développés, aux centrales nucléaires procure l'avantage de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques (à vapeur ou à gaz), mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets ont rendu cette énergie peu attractive pour les générations futures. Face à ces problèmes, les énergies renouvelables sont une alternative pour les générations à venir. Ces énergies offrent des avantages du fait qu'elles sont durables et réduisent l'émission de CO₂ provenant de la combustion des énergies fossiles. Parmi ces énergies, on retrouve l'énergie dite éolienne avec un taux de croissance européen et mondial très élevé, même si l'Algérie reste à la traîne dans ce secteur par rapport à son voisin Marocain.

L'énergie éolienne est véhiculée par le vent, celle-ci est due indirectement à l'énergie solaire, qui en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents. Un aérogénérateur est une machine qui utilise l'énergie cinétique du vent pour produire de l'énergie électrique.

Les progrès et la multiplication des éoliennes, à travers le monde, a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des recherches de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. La machine asynchrone double alimentée (MADA) est une solution concurrente en éolien à vitesse variable par rapport à la (MAS). Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau par contre le rotor est couplé à ce dernier via un convertisseur de fréquence. Sa robustesse est diminuée par la présence des contacts (balais/bagues). Les machines asynchrones à double alimentation est utilisée dans plusieurs applications surtout dans le domaine des fortes puissances comme les centrales éoliennes....Malgré toutes ces aptitudes, un certain nombre de contraintes de différentes natures peuvent restreindre la durée de leur vie, en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes provoquent des pertes économiques considérables, il est donc primordial de mettre en œuvre des systèmes de surveillance afin d'éviter les arrêts inattendus.

Les défauts peuvent être d'origine mécanique (excentricité du rotor, défaut sur les accouplements, usure des roulements,...), électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barre ou d'anneau,...) ou magnétique (défaut d'isolement entre les tôles statoriques). Les températures peuvent fournir des informations significatives sur les défauts et ainsi servir à déterminer un ensemble de paramètres représentant les signatures de défauts du moteur. La modélisation des défauts dans les systèmes éoliens et particulièrement les défauts d'ordre électriques, est une première étape nécessaire pour prédire le comportement du système en présence d'un défaut ou dès son apparition.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés principalement d'étudier le comportement précis des différentes grandeurs de machines asynchrones à double alimentation en présence d'un déséquilibre au réseau.

Notre travail est structuré de la manière suivante:

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.

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 portera présentation sur les machines asynchrones à double alimentation en présence d'un déséquilibre au réseau électrique pour analyser l'impact du défaut sur le comportement des machines asynchrones. Puis, on applique la transformation de Fourier rapide(FFT) pour l'analyse spectrale des grandeurs statorique et le couple électromagnétique (performances).

Le quatrième chapitre sera réservé à l'asservissement de la chaîne éolienne complet (vent, turbine, machine asynchrones à double alimentation et convertisseurs). Une

modélisation de la turbine et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible seront faites. Puis, on a analysés les performances la MADA pour les Deux régimes de fonctionnement (sain et déséquilibré).

Chapitre I

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

bobiné(standard).

Figure (I.33).Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.....(32)

Figure (I.34).Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais..... (33)

Figure (I.35).Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double.....(35)

alimentation [19].

Figure (I.36).Architecture d'un système d'entraînement à vitesse variable..... (38)

Figure (I.37).Evolution de la configuration électrique..... (40)

Chapitre II

Figure (II.1). Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation..... (46)

Figure (II.2). Passage du triphasé au biphasé La matrice de transformation est définie par :.....(49)

Figure(II.3).Couple électromagnétique.....(53)

Figure (II.4). Vitesse de rotation.....(53)

Figure (II.5). Courant rotorique réelle..... (53)

Figure (II.6). Courant rotorique de Park.....(53)

Figure (II.7). Flux statorique réelle.....(53)

Figure (II.8). Flux statorique de Park.....(53)

Figure (II.9).L'onduleur de tension associé à La machine.....(55)

Figure (II.10). Principe de la commande MLI- intersective.....(58)

Figure (II.11). Schéma de principe d'un redresseur MLI [40].....(59)

Figure (II.12).Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI.....(62)

Figure (II.13).Redresseur MLI triphasé et sa commande.....(62)

Figure (II.14). Principe du Contrôle par hystérésis.....(63)

Figure (II.15).Modulateur MLI à bande d'hystérésis.....(64)

Figure (II.16). La tension du bus continu.....(64)

Figure (II.17).Vitesse de rotation de la MADA alimentée par **réseau**..... (65)

Figure (II.18). Vitesse de rotation de la MADA alimentée par **l'onduleur (STPWM)**.....(65)

Figure (II.19) couple électromagnétique de la MADA alimentée par le **réseau**.....(65)

Figure (II.20).Couple électromagnétique de la MADA alimentée par **l'onduleur (STPWM)**.....(65)

Figure (II.21).Les Courants de phases rotoriques de la MADA alimentée par le **réseau**.....(65)

Figure (II.22). Les Courants de phases rotoriquesde la MADA alimentée.....(65)

par **l'onduleur(STPWM)**

Figure (II.23).Les Courants de phases rotoriques MADA alimentée par le **réseau (Zoom)**.....(66)

Figure (II.24).Les Courants de phases rotoriques MADA alimentée **par l'onduleur (Zoom)**.....(66)

Chapitre III

Figure (III.1).causes interne de défaillance(70)
Figure (III.2).causes externe de défaillance.....(71)
Figure (III.3).Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques en régime déséquilibré. (74)
Figure (III.4).Le FFT de la Machine asynchrone à double alimentation sans et avec..... (76)
déséquilibre

Chapitre IV

Figure (IV.1). Vitesse du vent V et la vitesse tangentielle (ΩR).....(81)
Figure (IV.2). Caractéristique de la turbine éolienne.....(81)
Figure (IV.3).Modèle mécanique de la turbine éolienne.....(82)
Figure (IV.4). Le schéma bloc du modèle de la turbine.....(84)
Figure (IV.5). Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance..... (85)
Figure (IV.6).Orientation du flux statorique..... (90)
Figure (IV.7). Schéma bloc de la MADA.....(93)
Figure (IV.8). Schéma bloc de la commande directe.....(94)
Figure (IV.9). Système régulé par un PI.....(94)
Figure (IV.10). schéma structure du system éolien global.....(96)
Figure (IV.11). Le profil de vent.....(97)
Figure (IV.12). La vitesse de rotation.....(97)
Figure (IV.13). La puissance aérodynamique.....(97)
Figure (IV.14). Le facteur de puissance.....(97)
Figure(IV.15)La puissance active statorique(98)
Figure(IV.16)La puissance réactive statorique.....(98)
Figure(IV.17).Le courant statorique.....(98)
Figure (IV.18). La courant rotation.....(98)
Figure (IV.19).La couple(99)
Figure (IV.20).La tensions statorique.....(99)
Figure. (IV.21) .Tension statorique en présence d'un déséquilibre.....(100)
Figure. (IV.22).la puissance active statorique en présence d'un déséquilibre.....(100)
Figure. (IV.23).Ta puissance réactive en présence d'un déséquilibre.....(100)
Figure. (IV.24).courants statorique en présence un déséquilibre.....(101)
Figure. (IV.25).Courants rotorique.....(101)

Figure.(IV.26).*couple électromagnétique*.....(101)
Figure. (IV.27).Le FFT de la MADA en régime sain et avec déséquilibre.....(102)

Introduction générale

Chapitre I
***Etat de l'art des systèmes de
conversion d'énergie éolienne***

Chapitre II
Modélisation de la MADA et la cascade
RED-OND-MADA en régime permanent

Chapitre III
***Performances d'une MADA alimenté
par un réseau déséquilibré***

Chapitre IV
Asservissement de la chaîne éolienne
en régime déséquilibré

Conclusion générale

Remerciement

Je tiens à remercier tout d'abord mon Dieu « الحمد لله رب العالمين ».

*Nous remercions très sincèrement Monsieur **DJ. KOUCHIH**, sans lui ce travail ne
serait jamais achevé, nous lui souhaitons*

du succès dans ses recherches ainsi que dans sa vie professionnelle

*Nous remercions vivement Monsieur **R. HACHELAF** ainsi que*

*Monsieur **N. BOUMALHA***

Pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée, leur disponibilité et

Surtout leur grande qualité humaine.

*Nous tenons à remercier les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de
participer à l'examen de ce travail*

*Nous remercions en particulier, Monsieur **M. BELAZOG**, et Madame **MERRAOUI**.*

*Enfin, nos remerciements vont à tous ceux qui portent de l'estime pour nous et qui
nous ont soutenus d'une manière ou d'une autre pour l'élaboration de ce travail.*

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.....(5)

I.2. Impact des énergies renouvelables sur l'environnement.....(6)

I.2.1. Energies renouvelables, définitions, ressources et exploitation.....(6)

I.2.1.1. Energies renouvelables.....(6)

I.2.1.2. Energies renouvelables dans le monde.....(6)

I.2.1.3. Energie hydraulique.....(7)

I.2.1.4. Energie solaire.....(7)

I.2.1.4.1. Energie solaire photovoltaïque.....(8)

I.2.1.4.2. Energie solaire thermique.....(8)

I.2.1.5. Energie géothermie..... (8)

I.2.1.6. Energie de la biomasse..... (9)

I.2.1.7. Energie éolienne.....(9)

I.3. Etat de l'art de l'éolien.....(9)

I.3.1. Historique de l'éolien.....(9)

I.3.2. Définition De l'énergie éolienne.....(10)

I.3.3. Principe de fonctionnement.....(11)

I.3.4. Classification des éoliennes.....(12)

I.3.4.1. Par rapport à leurs axes.....(12)

I.3.4.1.1. Eoliennes à axe vertical.....(12)

I.3.4.1.1a. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical.....	(12)
I.3.4.1.2. Eoliennes à axe horizontal.....	(12)
I.3.4.1.2c. Eoliennes rapides.....	(13)
I.3.4.1.2d. Eoliennes lentes.....	(13)
I.3.4.1.2e. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal.....	(13)
I.3.4.2. Par rapport à leurs gammes de puissances et leurs diamètres.....	(14)
I.3.4.2.1. Régulation de la puissance d'une éolienne.....	(14)
I.3.4.2.1a. Régulation mécanique.....	(15)
I.3.4.2.1b. Régulation électrique dans le but de maximiser l'énergie captée.....	(15)
I.3.5. Principaux composants d'une éolienne.....	(15)
I.3.5.1. La tour (mat).....	(16)
I.3.5.2. La nacelle.....	(16)
I.3.5.3. Les pales.....	(17)
I.3.5.4. Le rotor.....	(17)
I.3.5.4a. Les rotors à vitesse fixe.....	(18)
I.3.5.4b. Les rotors à vitesse variable.....	(18)
I.3.5.4c. Intérêts de la vitesse variable.....	(18)
I.3.5.5. Frein.....	(18)
I.3.5.6. La génératrice.....	(18)
I.3.5.7. Le multiplicateur.....	(19)
I.3.5.8. L'arbre de transmission.....	(19)
I.3.5.9. Le système de refroidissement.....	(20)
I.3.5.10. Les outils de mesure du vent.....	(20)
I.3.5.10a. Anémomètre.....	(20)
I.3.5.11. Système d'orientation de la nacelle.....	(20)
I.3.5.12. Système de contrôle (commande).....	(21)
I.3.5.13. La fondation en béton.....	(21)
I.3.6. Protection contre la corrosion.....	(21)
I.3.7. Avantage et inconvénients de l'énergie éolienne.....	(21)
I.3.8. L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains.....	(23)

I.4. Etude comparative des machines électriques utilisées dans la.....	(23)
production de l'énergie éolienne	
I.4.1. Types de machines électriques.....	(23)
I.4.1.1. Générateur synchrone.....	(23)
I.4.1.2. Générateur asynchrone.....	(24)
I.4.1.2.1. Machine asynchrone à cage d'écurueil.....	(24)
I.4.1.2.2. Machine asynchrone à double alimentation.....	(25)
I.5 Etat de l'art de la MADA.....	(26)
I.5.1. Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	(26)
I.5.2. Structure des machines asynchrones à double alimentation.....	(27)
I.5.2.1. Doubles alimentations par le stator.....	(28)
I.5.2.2. Double alimentation par le stator et le rotor.....	(29)
I.5.3. Classification des machines asynchrone à double alimentation.....	(30)
I.5.3.1 Machine asynchrone à double alimentation a rotor bobiné.....	(31)
I.5.3.2. Machine asynchrone à double alimentation en cascade asynchrone.....	(32)
I.5.3.3. Machine asynchrone à double alimentation sans balais.....	(32)
I.5.4. Comparaison entre les différentes variantes de Machine asynchrone.....	(33)
A double alimentation	
I.5.5. Mode de fonctionnement de la MADA.....	(34)
I.5.5.1. Fonctionnement à vitesse variable.....	(34)
I.5.5.2. Fonctionnement à vitesse fixe.....	(37)
I.5.6. Domaine d'application de la Machine asynchrone à double alimentation.....	(37)
I.5.6.1. Dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable.....	(37)
I.5.6.2. Dans les systèmes de génération éolienne à vitesse variable.....	(38)
I.5.6.2.1. Application de la MADA dans les systèmes éoliens.....	(39)
I.5.6.2.2. Type de machin électrique utilisée.....	(39)
I.5.7. Intérêt de la MADA.....	(40)
I.5.8. Avantages et inconvénients de la MADA.....	(41)
I.6. Conclusion.....	(42)

**CHAPITRE II : MODELISATION DE LA MADA ET LA CASCADE RED-OND-MADA EN
REGIME PERMANENT**

II.1. INTRODUCTION.....	(44)
Premier partie : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	
II.2. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	(45)
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 machine asynchrone à double alimentation 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.....	(50)
II.2.4.3.2. Référentiel lié au rotor.....	(50)
II.2.4.3.3. Référentiel lié au champ tournant.....	(51)
II.2.4.4. Mise sous forme d'équations d'état.....	(51)
II.2.5. Résultat de simulation	(52)
Deuxième partie : Modélisation de la cascade redresseur-onduleur-MADA	
II.3. Modélisation de l'onduleur de tension.....	(54)
II.3.1. Modèle mathématique de l'onduleur de tension.....	(55)
II.3.2. La technique de modulation «Sinus-triangle» (<i>STPWM</i>).....	(57)
II.4. Modalisation de redresseur MLI à bonde hystérésis.....	(58)
II.4.1. Structure générale du redresseur MLI.....	(59)
II.4.2. Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI.....	(59)
II.4.3. Modèle de redresseur MLI.....	(60)
II.4.4. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé.....	(60)
II.4.5. Le récepteur (la charge).....	(61)
II.4.6. Commande de redresseur MLI par hystérésis en courant.....	(62)
II.4.6.1. Principe de commande par hystérésis en courant.....	(63)
II.5. Résultats de simulation de la cascade Redresseur –Onduleur- MADA.....	(64)

II.6. Conclusion.....(67)

CHAPITRE III : PERFORMANCES D'UNE MADA ALIMENTE PAR UN RESEAU DESEQUILIBRE

III.1. Introduction.....(69)
III.2. Définition.....(69)
III.2.1. Déséquilibre à cause d'une défaillance de la machine.....(69)
III.2.2. Déséquilibre à cause d'un défaut au réseau.....(71)
III.3. Les résultats de simulation.....(72)
III.4. Analyse spectrale du courant statorique.....(74)
III.5. Résultats de simulation (FFT).....(75)
III.6. CONCLUSION.....(76)

**CHAPITRE IV : ASSERVISSEMENT DE LA CHAINE EOLIENNE EN REGIME SAIN ET
DESEQUILIBRE**

IV.1. Introduction.....(78)
IV.2. Modélisation de la turbine éolienne.....(78)
IV.3. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation de la turbine.....(79)
IV.3.1. Modèle du vent.....(79)
IV.3.2. Modèle aérodynamique.....(80)
IV.3.3. Le coefficient de vitesse réduite (tip-speed ratio).....(80)
IV.3.4. Modèle de la partie mécanique.....(82)
IV.3.4.1. Modèle du multiplicateur de vitesse.....(83)
IV.3.4.2. Modèle de l'arbre.....(83)
IV.3.5. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.....(85)
IV.3.5.1. Maximisation de la puissance extraite mppt.....(86)
(maximum power point tracking)
IV.4. Commande vectorielle par la puissance active et réactive.....(87)
IV.4.1. Principe de la commande vectorielle.....(87)
IV. 4.1.1. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....(87)
IV. 4.1.2. Choix du référentiel pour le modèle diphasé.....(89)
IV.4.2. Commande directe.....(93)
IV.4.3. Mise en place de la régulation.....(93)

IV.4.3.1. Synthèse du régulateur PI.....(94)

IV.5. Résultats de simulation.....(97)

IV.5.1. Réseau équilibré.....(97)

IV.5.2. Réseau déséquilibré.....(99)

IV.5.3. Résultat avec analyse spectrale par FFT.....(102)

IV.6. Conclusion.....(103)

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale.....(105)

Tableau (I.1). Dimensions des aérogénérateurs [13].....(14)

Tableau (I.2). Classification et comparaison des différentes variantes de.....(34)

la machine à double alimentation

Tableau (I.3).Tableau des différentes génératrices utilisées.....(37)