

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

DIB HAFSA

&

BELLILI MALIKA

pour l'obtention du diplôme MASTER en Électronique option SVR

Thème

L'ENERGIE EOLIENNE

Diagnostic d'une Machine Asynchrone Double Alimentation en présence des défauts de court circuit entre spire

Proposé par : monsieur RAFIK BRADAI

MOUHAMED AIDJA

Année Universitaire 2015-2016

DEDICACE

Je Dédie Ce Modeste Travail A Tout Ce Que Je Possède De Plus Cher Au Monde :

A Mes Chers Parents: Mon PERE Qui Ne Cesse Pas De M'encourager Et Qui M'à Toujours Soutenu, Ma Jolie MERE Qui Est Tout Pour Moi, Pour Sa Profonde Tendresse « Que Dieux Me Les Protège ».

A ma grande mère qui je l'aime et a toute ma famille .

A Mes Chers Frères Et Sœurs : SARA, RAFIKA , FATIMA ZOHRA et ABDE NACER

A mes meilleurs amies:

LILA, RIHAB, KHADIDJA, MALAK, MOULOUDA, IMANE, AHLEM, MALIKA HOUWARIYA, KANZA, AMIR

Mes remerciements vont également A mes collègues HANANE, WAFI, YOUCEF Et enfin tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin durant l'élaboration de ce travail.

DIB HAFSA

DEDICACE

Je Dédie Ce Modeste Travail A Tout Ce Que Je Possède De Plus Cher Au Monde :

A Mes Chers Parents: Mon PERE Qui Ne Cesse Pas De M'encourager Et Qui M'à Toujours Soutenu, Ma Jolie MERE Qui Est Tout Pour Moi, Pour Sa Profonde Tendresse

« Que Dieux Me Les Protège ».

A ma grande mère qui je l'aime et a toute ma famille .

A Mes Chers Frères : MOUNIR ET SOUHIL

A mes meilleurs amis : HAFSA, HOUARIYA, MARIYA

Mes remerciements vont également à ma copine SOUHILA

Et enfin tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin durant l'élaboration de ce travail.

BELLILI MALIKA

ب

Abstract

The wind is a permanent source of renewable energy, but it is not stable. To optimally exploit this energy, it is preferable to use generator operating at variable speeds, as was the case in this thesis, where we are making a model to the different parts of a wind turbine, those are: the turbine, doubly fed induction generator and electronics converters. A method for diagnosing is developed and defect detection of bridge in converter PMW.

The simulation results were satisfying and they show up how to use this kind of technology to produce electricity.

Key word: turbine, doubly fed induction generator, converter PMW

Résumé

Le vent est une source permanente d'énergie renouvelable, mais elle n'est pas stable. Pour une exploitation optimal de cette énergie, il faut utiliser des générateurs fonctionnant à des vitesses variables, comme été le cas dans cette étude qui traite la modalisation des différents composant de installation éolienne qu'ils sont : la machine asynchrone double les convertisseurs électronique. Une méthode de diagnostic a été développée ainsi selle de la détection de défauts dans convertisseur MLI.

Les résultats de simulation ont été satisfaisants et elles décrivent le mode d'emploi de ce type de technologie utilisée pour produire de l'électricité.

Les mots clé : turbine, génératrice asynchrone double alimentation, convertisseur MLI

ملخص

الرياح مصدر دائم لطاقة المتجددة لكنه غير مستقر فمن اجل الاستغلال الامثل لهذه الطاقة لابد من استعمال مولدات تعمل بسرعات متباينة كما هو الحال في هذه الدراسة التي تحتوي على النماذج الرياضية لمختلف المكونات الاساسية لهذا التركيبه والتي هي :

الترببين والمولد المتزامن ثنائي التغذية بالاضافة الى المحولات الاكترونية نتائج المحكاة كانت مرضية كما انها توضح طريقة عمل هذا النوع من التكنولوجيا المستعملة لتوليد الكهرباء
الكلمات المفتاحية الترببين مولد لا تزامني ثنائي التغذية المحولات

Remerciement

Notre dieu qui nous a donné la foi, le courage, la patience et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Nous adressons tout d'abord nos vifs remerciements à notre encadreur :

Monsieur Dr. Rafik Baradai à l'université de Blida de nous avoir proposé le sujet de cette thèse, pour la confiance qu'il nous a accordée et pour son soutien de ces grandes compétences et ces conseils judicieux durant l'année théorique.

Nous tenons également à remercier vivement tous nos collègues de la promotion 2015/2016 pour leurs amitiés et collaborations.

Du fond du cœur, nous remercions toutes les personnes nous ayant aidés de près ou de loin à mener ce travail.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, les générateurs éoliens occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans de nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau ou elle est injectée.

La MADA utilisée pour la génération d'énergie électrique dans le domaine d'énergie est considérée comme une solution écologique intéressante. Le générateur à induction doublement alimenté est davantage adapté pour cette application, parce qu'il reçoit une vitesse variable sur son arbre, et il doit produire une tension à amplitude et fréquence constantes côté charge, donc pour une génératrice autonome, débitant sur un site isolé, le problème devient plus complexe, car il faut contrôler aussi la tension et la fréquence du côté du stator

La naissance d'un défaut dans la MADA lors de son fonctionnement n'implique pas l'arrêt instantané de la machine, mais il affecte directement les performances de la machine telles que le couple électromagnétique, les courants et la vitesse. D'où la nécessité du diagnostic de la machine pour identifier, localiser et déterminer les causes des défauts [2]

Pour ce faire, on a réparti le manuscrit en quatre chapitres:

- Le 1^{er} chapitre contiendra des généralités sur les systèmes éoliens et les aérogénérateurs utilisés en ce moment, ainsi que les propriétés du vent et le principe de fonctionnement d'une turbine éolienne.
- Le 2^{em} chapitre contiendra une vue générale sur la machine asynchrone double alimentation avec une modélisation détaillée sur la dernière.
- Le 3^{em} chapitre parlera sur la modélisation du turbine ainsi le système d'association turbine-MADA avec une modélisation détaillée de les convertisseur MLI(redresseur, onduleur).
- Le 4^{em} chapitre contiendra la méthode de détection du défaut par l'analyse spectrale FFT.

Chapitre 1 : l'état de l'art

Figure 1.1. Eléments constituant une éolienne.....	5
Figure 1.2. Constitution d'une nacelle.....	6
Figure 1.3. Palier et arbre lent.....	6
Figure 1.4. Frein d'urgence.....	7
Figure 1.5. Le multiplicateur.....	7
Figure 1.6. Générateur.....	8
Figure 1.7. Girouette.....	9
Figure 1.8. Anémomètre.....	9
Figure 1.9. Moteur directionnel.....	10
Figure 1.10. Puissance suivant le diamètre de l'éolienne.....	10
Figure 1.11. Moyeu.....	11
Figure 1.12. Le moyeu et le couronne d'orientation des pales.....	11
Figure 1.13. Pales de remplacement mesurant environ 15 m de long.....	11
Figure 1.14. Feux d'obstacle.....	12
Figure 1.15. Le paratonnerre.....	12
Figure 1.16. Moteur d'orientation de la nacelle.....	13
Figure 1.17. Convertisseur et convertisseur.....	13
Figure 1.18. Exemple d'une éolienne à axe horizontal.....	15
Figure 1.19. Technologie éolienne à axe verticale	16
Chapitre 2 : Modélisation de génératrice asynchrone double alimentation	
Figure 2.1. Structure d'une machine asynchrone à double alimentation.....	23
Figure 2.2. Les quatre modes de fonctionnement d'une MADA.....	24

Figure 2.3. MAS piloté par le stator.....	26
Figure 2.4. MAS piloté par le rotor	26
Figure 2.5. Représentation schématique des bobinages rotorique et statorique (θ est un angle électrique désignant la position du rotor).....	29
Figure 2.6. Transformation de Park (abc à dq).....	31
Figure 2.7. Schéma de principe d'un défaut entre spires sur une phase statoriques as.....	36
Figure 2.8. Les tensions et les courants statoriques de la MADA.....	39
Figure 2.9. Les tensions et les courants rotorique de la MADA.....	40
Figure 2.10. La vitesse de rotation et teta de la MADA.....	40
Figure 2.11. Le couple de la MADA.....	40
Figure 2.1é. La vitesse de rotation de la MADA.....	41
Figure 2.13. Les courants statoriques dans le plan (abc).....	42
Figure 2.14. Les courants rotoriques dans le plan (abc).....	43
Figure 2.15. Les courants statoriques dans le repère Park.....	43
Figure 2.16. Les courants rotoriques dans le repère Park.....	44
Figure 2.17. Les courants de défaut pour différentes valeurs de résistance de défaut	45
 Chapitre 3 : Modélisation de la turbine éolienne	
Figure 3. 1. Schéma de la turbine éolienne.....	46
Figure 3. 2. Turbine tripale.....	47
Figure 3.3. Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne à grande puissance.....	50
Figure 3.4. structure globale d'une chaine de conversion de l'éolienne.....	52
Figure 3.5. Schéma d'un onduleur de tension.	54

Liste Des Figures

Figure 3.6. Redresseur triphasé double alternance.....	55
Figure 3.7. La tension de redresseur.....	57
Figure 3.8. La vitesse de vent.....	57
Figure 3.9. Le couple mécanique	58
Figure 3.10. Le couple de la turbine.....	58
Figure 3.11. Les tensions de l'onduleur.....	59
Figure 3.12. La puissance éolienne.....	59
Chapitre 4 : Détection des défauts par l'analyse spectrale (FFT)	
Figure 4.1. Représentation temporelle vers fréquentielle.....	63
Figure 4.1. l'analyse spectrale du courant statorique phase (a) sain.....	66
Figure 4.2. l'analyse spectrale du courant statorique phase (b) sain.....	66
Figure 4.3. l'analyse spectrale du courant statorique phase (c) sain.....	67
Figure 4.4. l'analyse spectrale de couple électromagnétique.....	67
Figure 4.5. l'analyse spectrale du courant statorique phase (a) défaut (a).....	68
Figure 4.6. l'analyse spectrale du courant statorique phase (b) défaut (a).....	69
Figure 4.7. l'analyse spectrale du courant statorique phase (c) défaut (a).....	69
Figure 4.8. l'analyse spectrale de couple électromagnétique avec défaut (a).....	70

Remerciements	
Dédicaces	
Résumer	
Abstract	
ملخص	
Table de matière	
Les abréviations et les acronymes	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre 1 : l'état de l'art de l'énergie éolienne	
1.1 Introduction.....	2
1.2 Historique	2
1.3 Définition.....	3
1.4 Quelques notions sur le vent.....	3
1.5 Etat de l'art, principes et descriptif d'une éolienne.....	4
1.5.1 Descriptif d'une éolienne.....	4
1.5.2 Principe de fonctionnement	11
1.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	13
1.6.1 Les avantages.....	14
1.6.2 Les inconvénients.....	14
1.7 Différents types d'éoliennes.....	15
1.7.1 Eoliennes à axe horizontal.....	15
1.7.1.a Avantage.....	15
1.7.1.b Inconvénients.....	15
1.7.2 Eoliennes à axe vertical	16
1.8 Les défaillances dans les machines électriques.....	18
1.8.1 Les causes de défaut.....	18
1.8.2 Défaillance due au réseau d'alimentation.....	18
1.8.3 Défaillances d'ordre mécaniques.....	19
1.8.4 Défaillances d'ordre électriques.....	19
1.9 Les méthodes de diagnostics.....	21
1.9.1 Diagnostic par les méthodes internes.....	21

Table de matière

1.9.2 Diagnostic par les méthodes externes.....	21
1.9.3 Diagnostic par les méthodes inductives.....	21
1.9.4 Diagnostic par les méthodes déductives.....	21
1.10 Conclusion	22
Chapitre 2 : Modélisation de la génératrice asynchrone double alimentation	
2.1 Introduction.....	23
2.2 Description de la MADA	23
2.2.1. Modes de fonctionnement de la MADA	24
2.2.1.a Double alimentation par le stator	25
2.2.1.b Double alimentation par le stator et le rotor	26
2.2.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	27
2.2.2.a Modèle circuit électrique	28
2.2.2.b Modèle circuit électrique de la machine saine.....	29
2.2.2.c Modèle circuit électrique avec défaut	34
2.3 Résultats de simulation	37
2.4 Conclusion	46
Chapitre 3 : Modélisation de la turbine éolienne	
3.1 Introduction.....	46
3.2 Modélisation de vent:.....	46
3.3 Modélisation de la turbine	46
3.3.1 LOI DE BETZ.....	47
3.4 Modèle du multiplicateur	49
3.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission	49
3.6 Stratégies de commande de la turbine éolienne.....	50
3.6 .1 La commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale.....	50
3.6.2 Caractéristique de puissance	51
3.6.3 Commande en dessous de la puissance nominale.....	52
3.6.3.a Principe de MPPT.....	52
3.7 Modélisation globale de la chaine de conversion de l'éolienne basé sur la MADA..	52
3.7.1 Alimentation utilisant des convertisseurs MLI.....	53
3.7.1.a Les Techniques de commande des convertisseurs MLI	53
3.7.2 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	54

Table de matière

3.7.3 Modélisation du redresseur triphasé double alternance à diodes.....	56
3.7 Résultats de simulation.....	58
3.8 Conclusion	61
Chapitre 4 : DETECTION DES DEFAUES PAR ANALYSE SPECTRALE	
4.1. Introduction.....	62
4.2. Système de surveillance.....	62
4.2.1 Les fonctions de la surveillance.....	62
4.2.1.a Détection	62
4.2.1.b Diagnostic	62
4.2.1.c La reprise	63
4.3. La surveillance de la machine asynchrone à double alimentation.....	63
4.3.1 Approche signal.....	63
4.3.1.a Analyse spectrale	63
4.3.2 Analyse spectral du courant statorique par la FFT.....	63
4.3.2.a Transformée de Fourier Rapide(FFT).....	64
4.4.2.b Résultat avec analyse spectral par FFT	66
4.5. Conclusion	71
Conclusion générale	72
Bibliographie	
Annexe	

Annexe A : les paramètres réels de la MADA .

	Désignations	Valeurs	Unités
Fv	coefficient de frottement de la mada	0.001	N.m.s.
Fs	Fréquence statorique	50	Hz
Fr	Fréquence rotorique	15	Hz
pn	Puissance nominale	15000	watt
N	Vitesse nominale	1440	Rad/s
Ten	Tension nominale statorique	690	vollt
Vr	Tension rotorique	10	volt
Rs	Résistance statorique	0.17	Ω
Rr	Résistance rotorique	0.2	Ω
Fsn	Flux statorique nominale	0.98	web
Ls	Inductance cyclique statorique	0.15	H
Lr	Inductance cyclique rotorique	0.1568	H
Lm	Inductance mutuelle	0.045	H
p	Nombre de paires de poles	2	-
Jt	Moment d'inertie	0.4	kg.m ²
Lls	Inductance de fuite statorique	0.012	H
Llr	Inductance de fuite rotorique	0.012	H
Lmr	Inductance mutuelle de fuite rotorique	0.22	H
Lms	Inductance mutuelle de fuite statorique	0.22	H
Lsr	Maximum de l'inductance entre phase statorique et rotorique	0.22	H
h	Pas	0.0005	-
tf	Temps finale	4	s
rf	Résistance de défaut	0.2	Ω

Annexe B : les paramètres de l'onduleur.

	Désignation	valeur
mm	L'indice de modulation	21
r	Coefficient de réglage	0.75
a	La porteuse	0.5
fm	La fréquence de modulation	mm*fr
Tm	Periode de modulation	1/fm
alpha	Angle	0.5
teta	Angle	0
teta-s	Angle statorique	0
tata-r	Angle rotorique	0

Annexe C : les paramètres de redresseur.

	valeur
RL	0.3
Ll	0.001
C	0.02
Di	0.1
i-eff	10
Fi	0.304
uc-ref	722
Rch	62
E _{max}	220*racine 2
V _s	220*racine 2

Annexe D : les paramètres de la turbine.

	valeur
Ro	1.225
Rayon	2.4
Redu	8.23
landa_opt	6.41
Copt	0.5483
Cext	0
Fvt	0.0071
cel	500
Pn	-400
MU	0
Seol	Rayon*pi

Chapitre 1

L'état de l'art de l'énergie éolienne

Chapitre 2 :

*Modélisation de la machine
asynchrone double alimentation
(La MADA)*

1.1 Introduction

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres.

Parmi ses énergies on aura l'énergie éolienne qui produit l'électricité grâce à la force des vents.

L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne ainsi que les différentes chaînes dans la conversion de l'énergie éolienne soit dans les systèmes connectés au réseau électrique ou dans les systèmes isolés et autonomes.

1.2 Historique

L'énergie éolienne, qui tire son nom d'Éole (dieu du vent dans la Grèce antique) est l'énergie produite par le vent. [10]

Cette énergie a d'abord été longtemps utilisée à partir de l'Antiquité pour un travail mécanique. Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer les bateaux, moudre du grain ou pomper de l'eau. Cette ressource nous sert désormais à produire de l'électricité.

Dans les années 90, l'amélioration de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 1 MW. [4]

L'énergie éolienne est aujourd'hui la plus accessible en termes de technologie et de coût. Elle est donc tout naturellement appelée à prendre une place importante dans le « mix énergétique » mondial.

Ces éoliennes servent à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydroélectrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.

L'énergie éolienne se développe à un rythme soutenu dans presque tous les pays du monde, avec une croissance de 30% par an. Ce fort développement est dû aux qualités environnementales de cette forme d'énergie mais également à d'autres facteurs économiques : rapidité d'installation, prévisibilité du coût sur le long terme, indépendance énergétique, aides financières, etc.

Bien au point techniquement, la production électrique éolienne est en plein essor. Que ce soit à l'échelle individuelle avec le petit éolien ou à l'échelle nationale avec le grand éolien, l'énergie

du vent peut contribuer à diversifier la production électrique de façon décentralisée, en ne produisant directement ni polluants ni CO2 et sans crainte d'épuisement de la ressource.

C'est surtout grâce à des tarifs liés aux fortes subventions, à son image vertueuse et à l'espoir que son développement industriel réussisse à en faire baisser les coûts, que l'énergie éolienne s'est développée. [10]

1.3 Définition

L'énergie du vent ou l'énergie éolienne est le résultat des déplacements de l'air. Plus spécifiquement, c'est 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 : c'est-à-dire l'énergie éolienne est directement utilisée, par exemple, le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin. [4]

Indirect : l'énergie éolienne est transformée 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. [4]

1.4 Quelques notions sur le vent

Le vent est le résultat des déplacements de l'air.

Sur la terre, presque tous les vents sont créés par le rayonnement solaire : Le soleil réchauffe une masse terrestre et la chaleur de la terre est absorbée par l'air environnant, lorsque l'air atteint une certaine température, il commence à s'élever rapidement en hauteur.

Ceci crée au niveau du sol une région de basse pression, et au-dessus du sol une région de haute pression.

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers. Le vent est défini par sa direction, et sa vitesse.

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions.

Aux altitudes moyennes et aux grandes altitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire.

Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud. Les sens sont inversés par rapport aux précédents.

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression).

Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories. [9]

1.5 Etat de l'art, principes et descriptif d'une éolienne

L'énergie éolienne peut être utilisée de trois manières :

- ✓ 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 irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- ✓ Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...).
- ✓ Production d'énergie électrique; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour produire du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. [4]

1.5.1 Descriptif d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de:

Fondation, le mât (tour ou pylône), le rotor (moyeu et pales) et la nacelle comme il est montré sur la figure suivante:

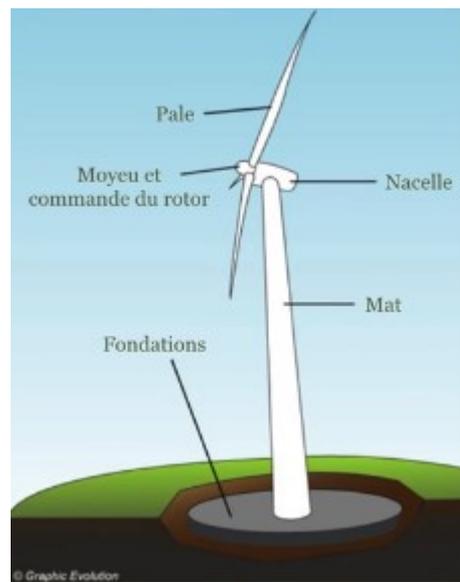


Figure 1.1. Eléments constituant une éolienne.

a. la Fondation

C'est une assise de béton qui permet de fixer de façon rigide l'ensemble de la structure de l'éolienne. [4]

b. la Tour ou mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. [11]

Le mât peut être réalisé en acier roulé ou plié, protégé contre la corrosion ou bien en béton armé. [4]

➤ **Types de tours**

Il existe trois grands types de tour :

- ✓ Tours haubanés
- ✓ Tours treillis
- ✓ Tours hybrides

Quel que soit le type du support utilisé il faut tenir compte de :

- la Protection contre la corrosion.
- la Facilité de montage.
- Risque de givrage. [4]

C. la nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses

périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine utilisée. [4]

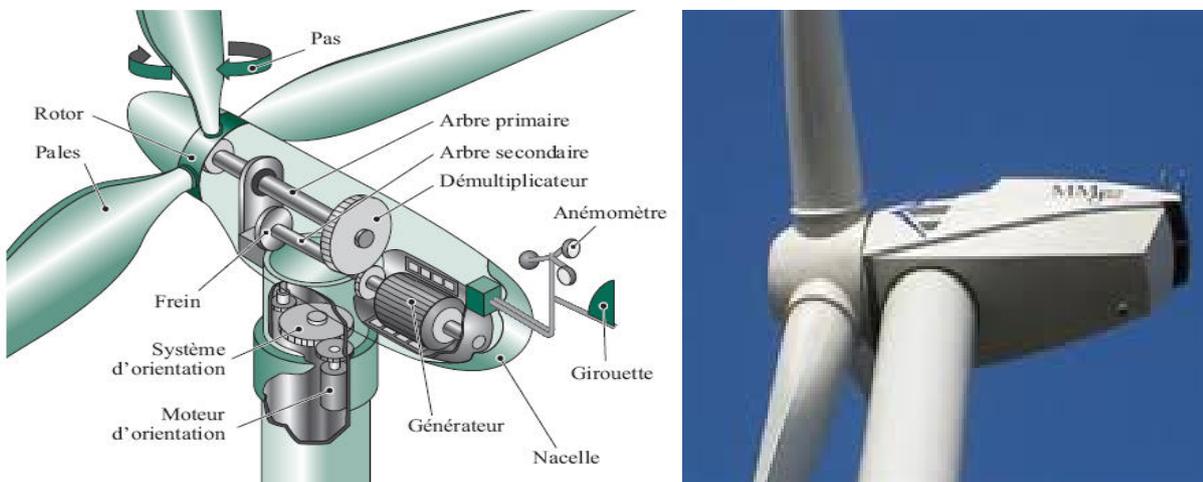


Figure 1.2. Constitution d'une nacelle.

- **Les différents composants d'une nacelle :** [18],[19],[20]
- **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).

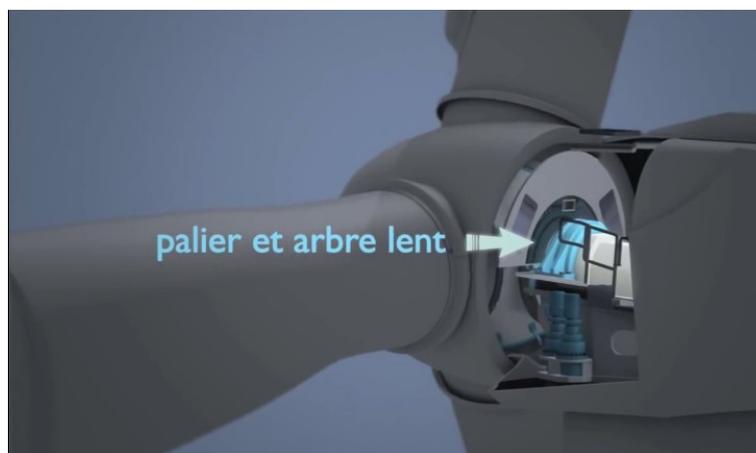


Figure 1.3. Palier et arbre lent.

- ✓ **L'arbre secondaire :** il entraîne la génératrice à des vitesses élevées (environ 2000 tr/minute) et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence.
- **Frein :** L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

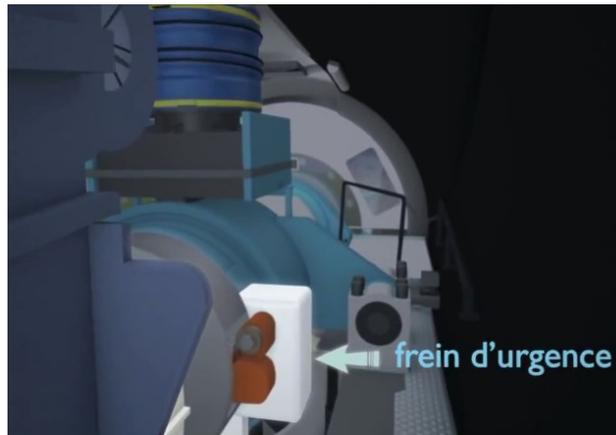


Figure 1.4. Frein d'urgence.

- **Multiplicateur de vitesse :** Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire mu par le vent, et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

Le multiplicateur est un convertisseur de puissance. Il multiplie la vitesse d'entrée (rotor) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique. La puissance produite par la rotation du rotor d'une éolienne est transmise à la génératrice par toute une chaîne dynamique, c-à-d, par l'arbre lent (primaire), le multiplicateur et l'arbre rapide (secondaire). Le multiplicateur est monté sur plots élastiques (plots de caoutchouc) pour amortir les vibrations et limiter la transmission du bruit à la structure porteuse. Il peut aussi être monté flottant pour encaisser les à-coups de couple.



Figure 1.5. Le multiplicateur.

Trois types de multiplicateurs peuvent être utilisés :

- Multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues d'entrées cylindriques. D'une réalisation économique. Pour un rapport de multiplication élevée, il est encombrant.
- Multiplicateur à engrenages avec trains planétaires qui permettent de réaliser des

rappports de multiplication élevée sous un encombrement réduit et avec un bon rendement de transmission.

- Réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée. Les multiplicateurs industriels sont conçus pour assurer le fonctionnement silencieux des éoliennes.
- **La génératrice** : C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

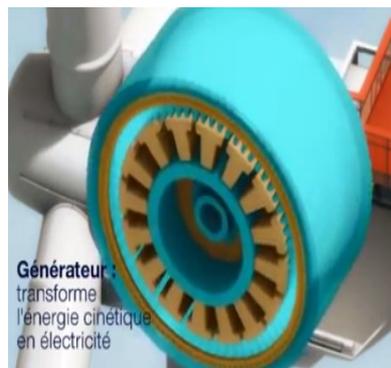


Figure 1.6. Générateur.

- **Un contrôleur électronique** : Chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne.

Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de La machine, l'orientation de l'ensemble rotor nacelle face au vent de manière à Maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le Contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

Chaque éolienne est équipée de son propre automate de contrôle. En générale on installe un système de contrôle et de commande tout en bas de la tour et à l'intérieur de la nacelle, la communication entre les deux systèmes est assurée par des fibres optiques. Sur certains nouveaux modèles, on a placé un troisième système de contrôle dans le moyeu du rotor. Cette unité communique avec le système de contrôle situé dans la nacelle par des communications en série au travers de câbles couplés par des bagues et des balais sur l'arbre lent.

- **Divers dispositifs de refroidissement** : Le refroidissement des composantes situées à l'intérieur de la nacelle est assuré par des ventilateurs ou bien par des radiateurs d'eau

ou d'huile.

- **Les outils de mesure du vent** : nous avons deux types :
 - ✓ **une girouette** (Figure 1.7) : permet de mesurer la direction du vent. Celle-ci est fixée sur un axe vertical à la base duquel se trouve une rose des vents
 - ✓ **un anémomètre** (Figure 1.8) : fournit le module du vecteur vent (vitesse ou force du vent), on l'exprime en mètre/seconde ou en nœud ($1 \text{ nœud} = 0.515 \text{ m/s}$). Il existe plusieurs types d'anémomètre (à ultrason ou à laser, à fil chaud) mais l'anémomètre le plus utilisé c'est l'anémomètre à coupelle (moulinet) : Il est muni d'un rotor de trois coupelles en métal ou en plastique qui sous l'effet du vent se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse est enregistrée électroniquement.



Figure 1.7. Girouette.



Figure 1.8. Anémomètre.

- **Moteur d'orientation** : Le dispositif d'orientation de la nacelle permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. Cette couronne est intégrée au roulement d'orientation et peut être extérieure ou intérieure ; elle est soumise à des efforts importants.

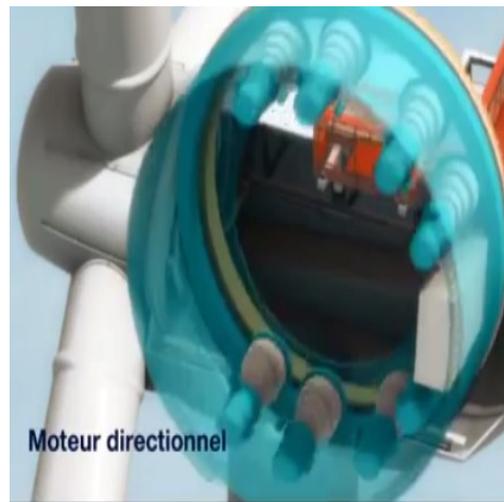


Figure 1.9. Moteur directionnel.

D .Le rotor (moyeu et pales) :

Le rotor est composé des pales qui sont montées sur un moyeu, c'est la partie mobile du système.

Le vent circule au-dessus des pales et convertit l'énergie cinétique du vent qui se déplace en mouvement de rotation du rotor. Le diamètre du cercle formé par les pales du rotor détermine la quantité d'énergie pouvant être extraite du vent et par conséquent la puissance générée par le système. [4]

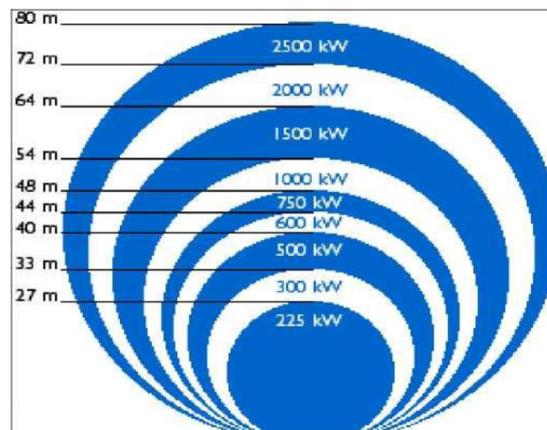


Figure 1.10. Puissance suivant le diamètre de l'éolienne.

➤ **Moyeu :**

En générale c'est une pièce d'acier moulé, il reçoit les pales sur des brides normalisées et se monte sur l'arbre lent (primaire) du multiplicateur. Sa conception utilise les éléments finis. Il est souvent protégé par une coupe en polyester forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique (plus esthétique que fonctionnelle). [4]

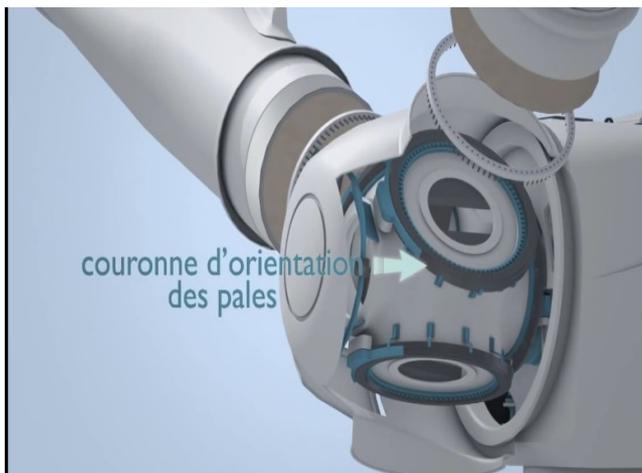


Figure 1.11. Le moyeu et le couronne d'orientation des pales. **Figure 1.12.** Moyeu.

➤ Les Pales



Figure 1.13. Pales de remplacement mesurant environ 15 m de long.

Les pales sont une partie très importante des éoliennes, le nombre de pales influence directement l'efficacité de conversion du rotor, plus le nombre de pales est élevé, plus le couple transmis à l'arbre du rotor sera grand. [4]

1.5.2 Principe de fonctionnement

Pour augmenter l'efficacité d'une éolienne, la nacelle s'oriente pour être toujours face en vent.

Si le vent est trop faible, les pales pivotent de manière à capter le maximum de vent. Si le vent est trop fort il se maintiendra pour mesure de sécurité et l'éolienne s'arrête.

Dans la nacelle le mouvement de rotor est transmis à l'arbre lent, la vitesse de rotation de l'arbre lent est augmentée par le multiplicateur qui est la boîte de vitesse de l'éolienne.

La génératrice fonctionne sur le principe de la dynamo (produit un courant continu, peut aussi être utilisé comme générateur. Ce courant ne peut pas transporter facilement car il y a des grosses déperditions d'électricité dans les câbles électriques, (transformer le courant continue en courant alternatif grâce à un alternateur), il transforme l'énergie de vent en électricité.

Le frein permet de stopper le mouvement de rotation de rotor, il est utilisé le cas d'urgence, sur le toit se trouve le capteur pour le pilotage d'éolienne.

Le feu d'obstacle est un élément de sécurité qui permet au trafic aérienne de repérer à l'éolienne à distance.

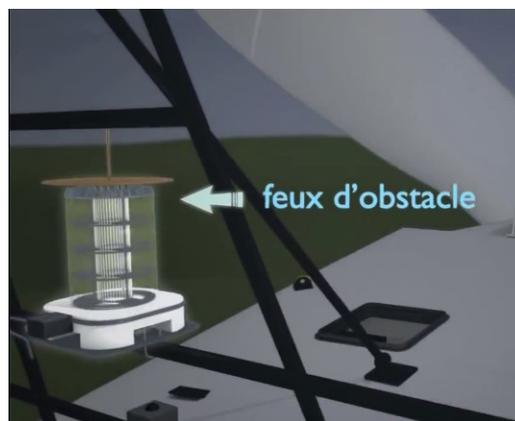


Figure 1.14. Feux d'obstacle.

Le paratonnerre protège l'éolienne contre la foudre.

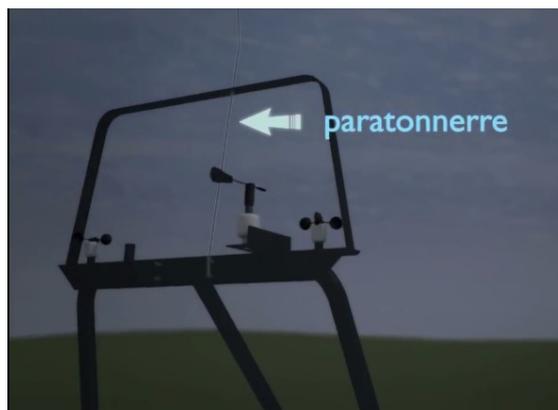


Figure 1.15. Le paratonnerre.

Quatre puissant de moteur peut pivoter la nacelle pour s'orienté la direction de vent.

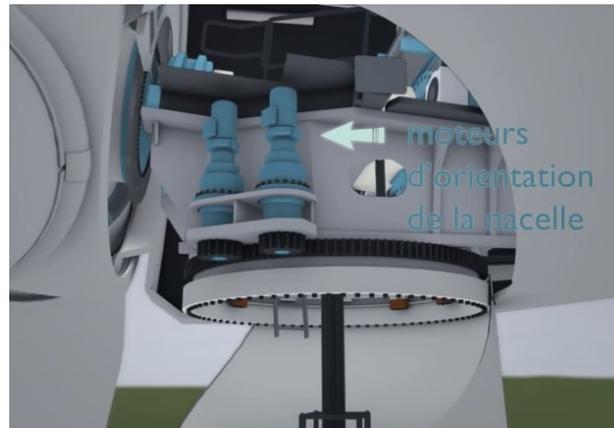


Figure 1.16. Moteur d'orientation de la nacelle.

Le courant est transporté au bas de mât il passe par le convertisseur qui synchronisé l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau électrique, le courant est transformé en électricité en tension et passant de 680 V à 30000 V.



Figure 1.17. Convertisseur et convertisseur.

L'électricité ainsi produite par l'éolienne est envoyée par le poste de source qui est composé d'un transformateur et d'un disjoncteur.

Le transformateur sert à élever la tension électrique de 30000 V à 225000 V.

Le disjoncteur sert à protéger le réseau électrique des surtensions. Le poste de source permet de distribuer l'électricité sur l'ensemble des réseaux électrique. [18]

1.6 Avantages 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. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que

ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

1.6.1 Les avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, fiable, gratuite, inépuisable économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- ✓ Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- ✓ 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 thermiques et des centrales nucléaires.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ✓ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie.
- ✓ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles. [12]
- ✓ C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas, ni de gaz à effet de serre, ni de production de déchets « déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire ».
- ✓ Utilisable dans tous les endroits fortement exposés aux vents. [4]

1.6.2 Les inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages:

- ✓ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- ✓ énergie change suivant la météo : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- ✓ Impact visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage.
- ✓ Les oiseaux: les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. [4]

1.7 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

1.7.1 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. [4]



Figure 1.18. Exemple d'une éolienne à axe horizontal.

1.7.1.a Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
 - Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
 - Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.
- [25]

1.7.1.b Inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. [25]

1.7.2 Eoliennes à axe vertical

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux

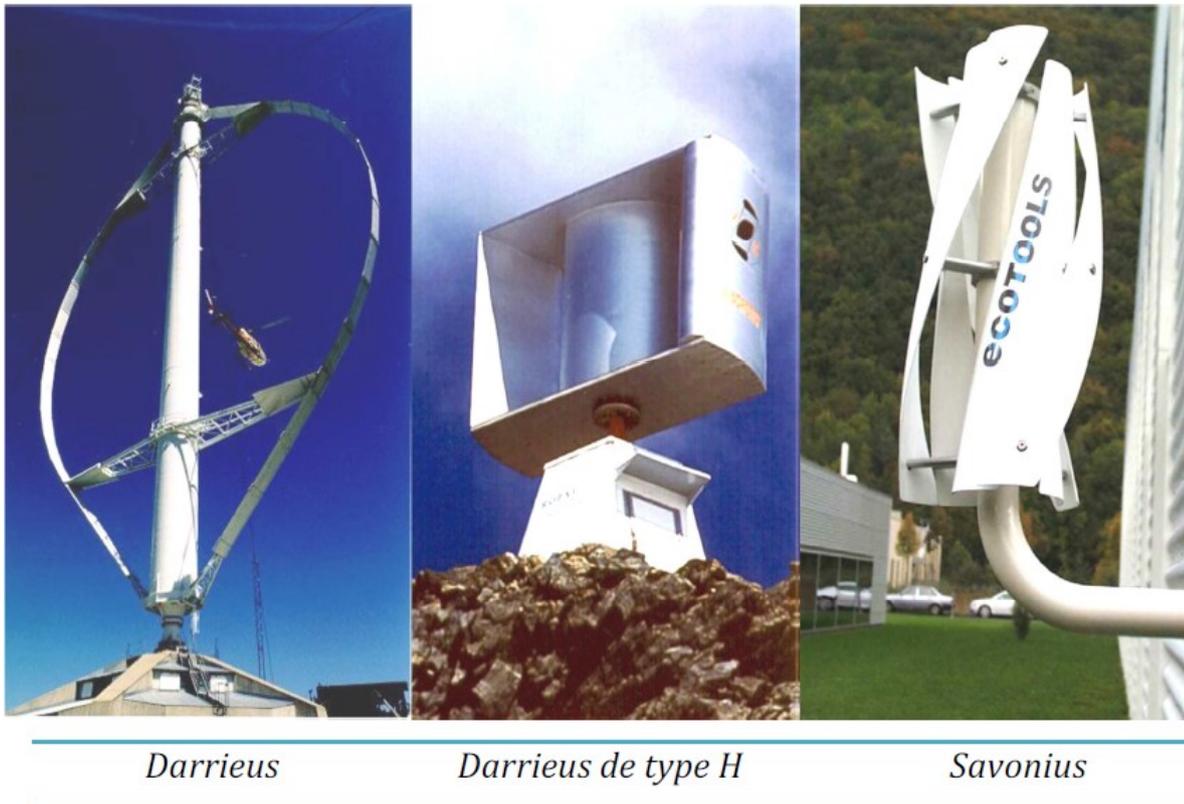


Figure 1.19. Technologie éolienne à axe vertical.

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins rependue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit.

1.7.2.a Avantages

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

1.7.2.b Inconvénient

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.

- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour. [25]

➤ Les raisons pour choisir une grande éolienne

1. Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes.

Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande..) sont plus ou moins les mêmes, quel que soit la taille de l'éolienne.

2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

[12]

➤ Les raisons pour choisir une éolienne plus petite :

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.

2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.

4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus

petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

On distingue aussi le "grand éolien", qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36 KW). [12]

1.8 Les défaillances dans les machines électriques

On désigne par défaillance dans les machines électriques tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques.

1.8.1 Les causes des défauts

- les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations,
- les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement,
- les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, ... [1]

1.8.2 Défaillance due au réseau d'alimentation

Les réseaux et les installations électriques sont le siège d'incidents de nature aléatoire, dont les plus fréquents sont:

- Court-circuit entre les phases.
- Coupure de phase d'alimentation.
- Déséquilibre des tensions d'alimentation.

Les répercussions de ces anomalies sur la continuité du service et le fonctionnement des équipements dépendent de la nature du défaut. Ce dernier est provoqué soit dans les réseaux aériens soit par des contraintes de nature:

- Climatique (pluie, foudre ...).

- D'environnement (branches d'arbres, plombes de chasses,...).
- Par suite de l'interconnexion des différents réseaux. [17]

1.8.3 Défaillance d'ordre mécanique

1.8.3.a.1 Défaillances des roulements mécaniques

Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure des roulements et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. [1]

1.8.3.a.2 Défauts d'isolant dans un enroulement

Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- vibrations mécaniques.
- vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- fonctionnement dans un environnement sévère. [1]

1.8.4 Défaillances d'ordre électriques

1.8.4.a Défaillances au rotor

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...).
- électromagnétique .
- résiduel (déformation,...).
- dynamique (arbre de transmission,...).
- environnemental (agression,...).

1.8.4.b Défaillances au stator

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la

structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème

Thermique : l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement .

Electrique : Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs du à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant.

Mécanique : les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne

Environnemental : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et bâti, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique. [1]

1.8.4.c Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la localisation du défaut. [1]

1.8.4.d Court-circuit entre spire

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Ce défaut a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique dans le cas des machines asynchrones. [1]

1.9 Les Méthodes de diagnostic [17]

On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes familles :

- Les méthodes internes et externes.
- Les méthodes inductives et déductives

1.9.1 Diagnostic par les méthodes internes

Ces méthodes de diagnostic internes reposent sur la comparaison de mesures réelles sur le système à surveiller et des informations que fournit le modèle. Les écarts caractérisent le fonctionnement du système:

- ✓ à un écart nul, correspond un fonctionnement de type normal.
- ✓ à un écart non nul, correspond un fonctionnement de type défaillant.

1.9.2 Diagnostic par les méthodes externes

La seule connaissance repose sur l'expertise humaine par apprentissage.

Le module de reconnaissance utilise les observateurs issues du système, des entrées et des sorties, afin de trouver les relations de cause à effet.

1.9.3 Diagnostic par les Méthodes inductives

Ces méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système.

1.9.4 Diagnostic par les Méthodes déductives

Une vérification des «effets trouvés par rapport aux effets possibles » permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut.

1.10 Conclusion

Les éoliennes présentent une source d'énergie propre. Les désagréments qu'elles peuvent présenter sont facilement évitables si elles font l'objet d'une gestion précise et intelligente.

Pour les constructeurs d'éoliennes, l'objectif principal des activités de recherches est de continuer à améliorer le rapport entre le cout et la performance des éoliennes. Un bon dimensionnement et un bon choix du matériel garantissent le bon fonctionnement de l'installation, sa durée de vie et sa rentabilité.

Dans le chapitre suivant, nous allons voir la modélisation de la génératrice

Chapitre 2

*Modélisation de la machine
asynchrone double alimentation*

2.1 Introduction

La machine asynchrone occupe une grande place dans les applications industrielles. La croissance d'utilisation de cette machine électrique est essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût, et robustesse mécanique. Cependant, ces machines sont utilisées de plus en plus dans les applications à vitesse variable nécessitant une alimentation par onduleurs de tension dont les composants commutent de plus en plus rapidement. De ce fait, on assiste à un vieillissement prématuré de leur isolant entraînant des défauts électriques entre spires ou phase bâti.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord la construction et le mode de fonctionnement de la machine asynchrone double alimentation nous ensuite nous faisons une modélisation de la MADA asynchrone sain après nous établissons un modèle circuit électrique pour MADA avec défaut entre spires.

2.2 Description de la MADA

Une machine asynchrone à double alimentation MADA est constituée d'un stator fixe équipé de trois enroulements identiques répartis d'une manière symétrique dans les encoches au stator, et d'un rotor tournant autour de l'axe de la machine équipé lui aussi de trois enroulements identiques et symétrique couplés en étoile et reliés à un collecteur constitué de trois bagues figure (2.1).

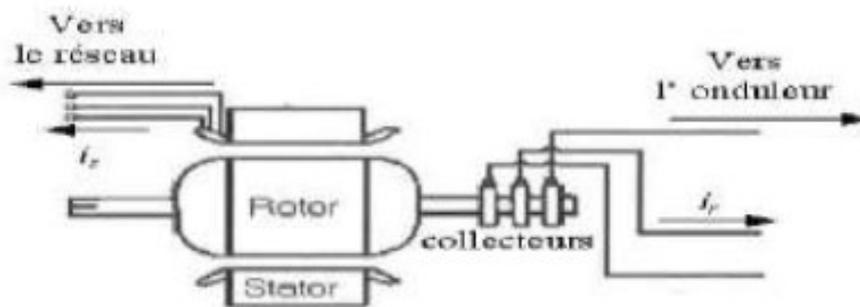


Figure 2.1. Structure d'une machine asynchrone à double alimentation.

Les trois enroulements rotoriques sont reliés à travers des balais glissants sur les bagues du rotor à un convertisseur d'électronique de puissance pour assurer une deuxième alimentation par le rotor. Selon le mode de fonctionnement, l'ensemble machine asynchrone, convertisseur et éventuellement un transformateur est appelé cascade hypo ou hyper synchrone. [2]

2.2.1. Modes de fonctionnement de la MADA

la MADA fonctionne en moteur et en générateur, la différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement. Dans le cas d'une MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable. La figure (2.2) montre les différents modes de fonctionnement de la MADA, en moteur hypo synchrone ou hyper synchrone dans les quadrants a et b respectivement et en générateur hypo synchrone ou hyper synchrone dans les quadrants c et d respectivement. Seuls les quadrants c et d sont exploitables pour la production de l'énergie électrique, donc nous nous intéressons dans notre étude à ces deux quadrants pour la production d'énergie éolienne.

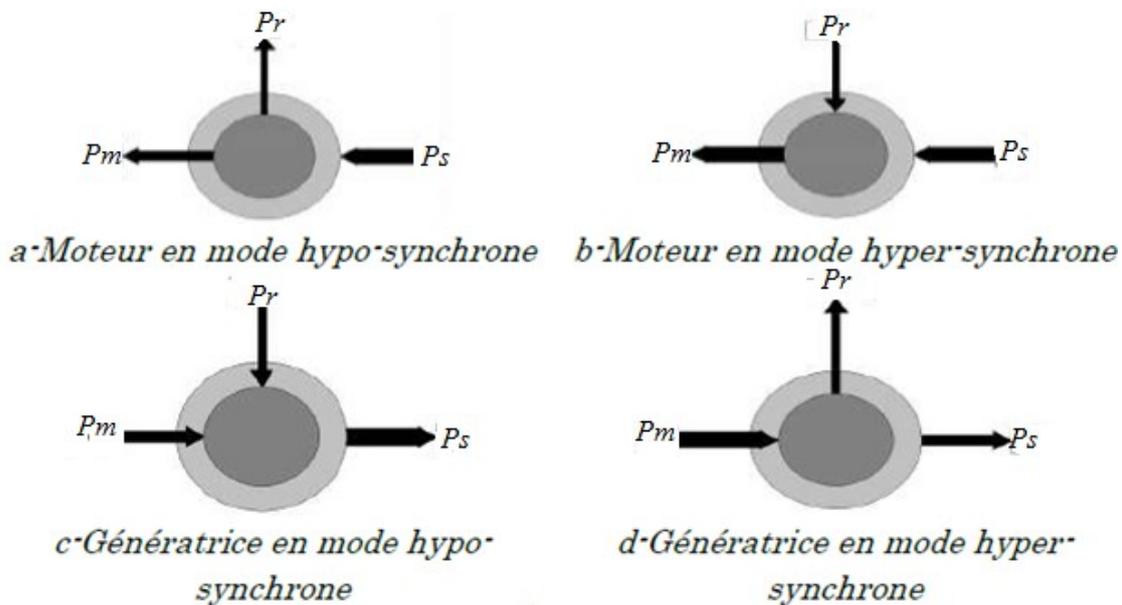


Figure 2.2. Les quatre modes de fonctionnement d'une MADA.

P_s : Puissance statorique.

P_r : Puissance rotorique.

P_m : Puissance mécanique.

✓ **Fonctionnement moteur :**

Pour un fonctionnement en moteur, la force magnétomotrice résultante F est en avance sur la force magnétomotrice F_r . Le couple sur l'arbre de la machine est un couple résistant dans le sens contraire de la vitesse de rotation du champ tournant F_s et le couple

électromagnétique T_{em} de la machine est un couple moteur dans le même sens que le sens de rotation. [2]

✓ **Fonctionnement générateur :**

Pour un fonctionnement en génératrice, la MADA requiert un couple sur l'arbre de la machine dans le même sens que le sens de rotation du champ tournant F_s . L'effet de ce couple provoque un décalage en avant des pôles du rotor par rapport aux pôles du stator et par conséquent la force magnétomotrice du rotor F_r est en avance sur les forces magnétomotrices F_s et F . Le couple électromagnétique de la machine qui s'exerce sur le rotor devient un couple résistant dans le sens contraire du sens de rotation de la machine. [2]

2.2.1.a Double alimentation par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (Figure 2.3). 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 paires 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 du générateur 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 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.

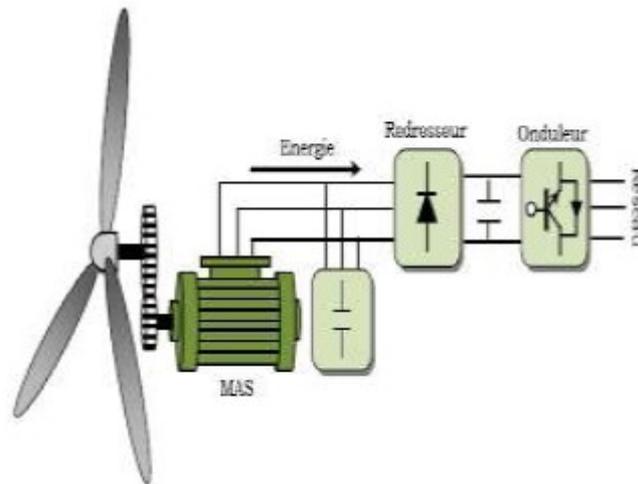


Figure 2.3. MAS piloté par le stator.

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. [2]

2.2.1.b Double alimentation par le rotor

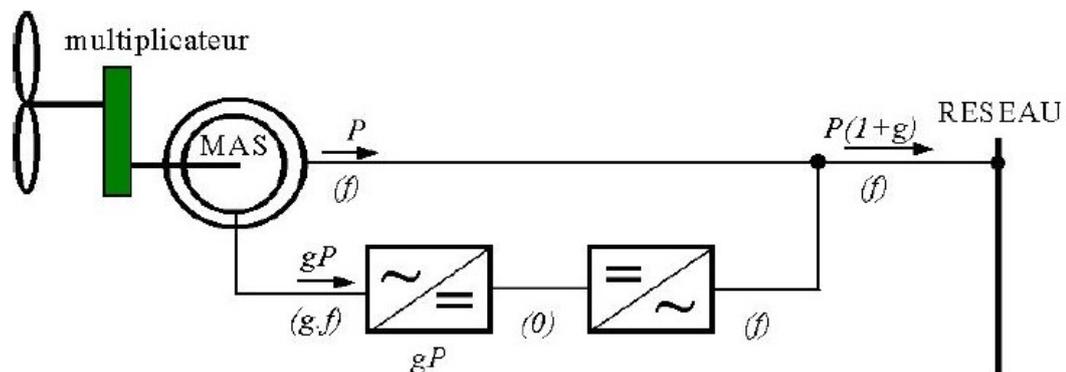


Figure 2.4. MAS piloté par le rotor.

✓ Principe

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne.

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse la puissance P est fournie par le stator et traverse l'entrefer une partie de cette puissance fournie, $(1 - g) P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique; le reste, $(g.P)$ 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 2.3). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique. Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.é.m. dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.é.m. créés au rotor et au stator est

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (2.1)$$

N_r et N_s sont respectivement le nombre des spires des bobinages rotoriques et statoriques. Sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique.

En définissant le glissement par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (2.2)$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{N_r}{N_s} \quad (2.3)$$

Donc, le rapport entre la puissance au rotor et la puissance au stator devient :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{i_r}{i_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = g \quad (2.4)$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor et plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice équation (2.4) en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g . [2]

2.2.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Pour commander la machine asynchrone à double alimentation, comme bien d'autres procédés, il nous faut disposer de son modèle avec une connaissance plus ou moins précise

des éléments le constituant. Mathématiquement, à partir de ce modèle, on peut faire la conception et la simulation des algorithmes de commande ; ainsi que l'étude et l'analyse des régimes transitoires. De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle comportemental. [2]

2.2.2.a Modèle circuit électrique

Dans cette partie nous présentons un modèle circuit électrique pour la machine asynchrone avec défaut entre-spores. La machine est modélisée par un circuit électrique équivalent. Ce circuit fait intervenir les résistances, les inductances et les mutuelles inductances dont les valeurs peuvent être déterminées de différentes manières. Dans les modèles circuits, la première étape consiste à représenter le dispositif par autant de circuits couplés qu'il en existe physiquement.

L'application de la transformation de Concordia (triphasee - diphasée) nous permet de réduire l'ordre du système sachant que les courants des phases sont à somme nulle.

Dans la première partie, on va présenter les hypothèses de la modélisation par circuit électrique de la MAS. Dans la deuxième partie, on fait un rappel du modèle circuit de la machine asynchrone saine. Le modèle de la machine en présence de défaut entre spores sera ensuite établi en troisième partie.

✓ Hypothèses considérées pour le modèle circuit électrique de la MADA

- L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables.
- Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- La FMM créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale.
- La symétrie de construction est parfaite.

La position du rotor en rotation, par rapport au stator fixe est en fonction de la vitesse de rotation Ω , telle que $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$, où θ est l'angle entre l'enroulement statorique (A) et l'enroulement rotoriques (a) en chaque instant, comme montré sur la figure ci-dessous. [2]

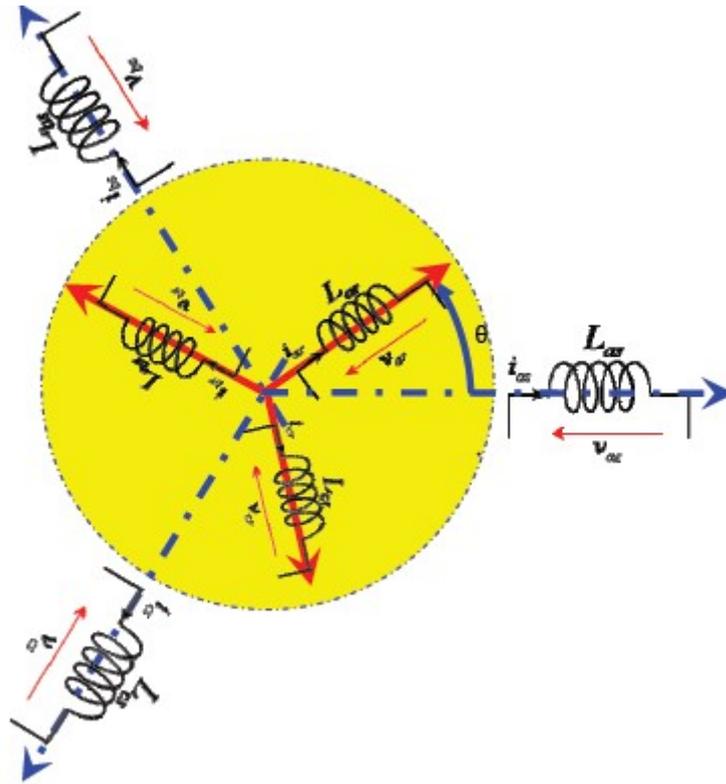


Figure 2.5. Représentation schématique des bobinages rotorique et statorique (θ est un angle électrique désignant la position du rotor).

2.2.2.b Modèle circuit électrique de la machine saine

a. Rappel sur la loi de Faraday

La loi de Faraday exprime la relation entre la tension (V) aux bornes d'une bobine, de résistance R_B d'inductance L_B , le courant i , la variation du flux totalisé φ_t :

$$V = R_B \cdot i + \frac{d\varphi_t}{dt} \quad \text{d'ou:} \quad \frac{d\varphi_t}{dt} = V - R_B \cdot i \quad (2.5)$$

Avec $(\varphi_t) = \varphi + \varphi_c$ où φ_c est un flux de couplage magnétique avec d'autres enroulements, et φ est le flux propre de l'enroulement. [2]

b. Mise en équation de la partie électrique dans le plan (abc)

D'après les hypothèses simplificatrices, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements. En appliquant la loi de Faraday aux enroulements de la machine asynchrone, on détermine les équations différentielles exprimant les différents flux.

$$\begin{matrix} \text{stator} & \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa} & R_s & 0 & 0 \\ V_{sb} & 0 & R_s & 0 \\ V_{sc} & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{matrix} \text{ro tor} & \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ra} & R_r & 0 & 0 \\ V_{rb} & 0 & R_r & 0 \\ V_{rc} & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$\frac{d}{dt} [\varphi_{s \ abc}] = [V_{s \ abc}] - [R_s][I_{s \ abc}]$$

$$\frac{d}{dt} [\varphi_{r \ abc}] = [V_{r \ abc}] - [R_r][I_{r \ abc}]$$

- $I_{s,r (a;b;c)}$ sont les courants au stator et au rotor de la machine.
- $\varphi_{s,r (a;b;c)}$ sont les flux propres circulants au stator et au rotor de la machine.
- $V_{s,r (a;b;c)}$ sont les tensions simples triphasées au stator et au rotor de la machine.
- R_s est la résistance de l'enroulement statorique.
- R_r est la résistance de l'enroulement rotorique.

On définit les vecteurs flux suivant :

$$\begin{aligned} [\varphi_s] &= L_{ss}I_s + [M_{sr}]I_r \\ [\varphi_r] &= [M_{rs}]I_s + L_{rr}I_r \end{aligned} \quad (2.7)$$

L_s : Inductance propre des enroulements statoriques.

M_s : Inductance mutuelle des enroulements statoriques $M = \frac{-L_s}{2}$.

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

L_r : Inductance propre des enroulements rotoriques.

M_r : Inductance mutuelle des enroulements rotoriques $M = \frac{-L_r}{2}$.

Et finalement :

$$M_{sr} = M_{rs}^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Où M représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator-Rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre. [2]

c. Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de Park [20] [2]

La transformation de Park définie par la matrice de rotation permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (d, q, o). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère.

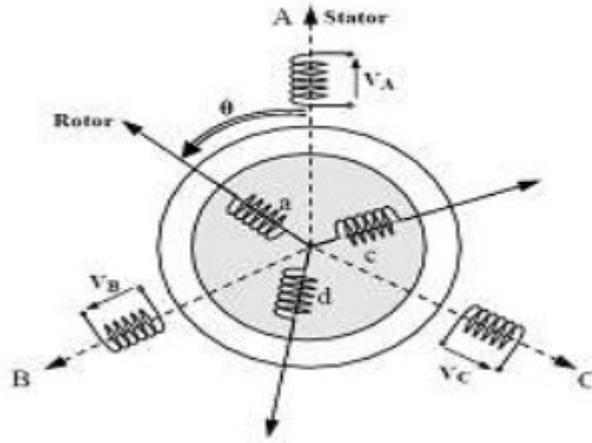


Figure 2.6. Transformation de Park (abc à dq).

$$P\theta = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

La (figure 2.6), montre alors la disposition des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

Le rotor et le stator de la machine, alors désignés machine de Park, tournent à la même vitesse de telle sorte que les flux et les courants sont liés par une expression indépendante du temps. En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel, un modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires:

$$\frac{d}{dt} \varphi_{s \, dqo} = V_{s \, dqo} - R_s \cdot i_{s \, dqo} - \delta \cdot \varphi_{s \, dqo} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \quad (2.11)$$

$$\frac{d}{dt} \varphi_{r \, dqo} = V_{r \, dqo} - R_r \cdot i_{r \, dqo} - \delta \cdot \varphi_{r \, dqo} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.12)$$

$$\delta = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$V_{s \, dqo}$: est le vecteur tension statorique dans le repère de Park.

$i_{s \, dqo}$: est le vecteur courant statorique dans le repère de Park.

$\varphi_{s \, dqo}$: est le vecteur flux statorique dans le repère de Park.

$V_{r\ dq0}$: est le vecteur tension rotorique dans le repère de Park.

$i_{r\ dq0}$: est le vecteur courant rotorique dans le repère de Park.

$\varphi_{r\ dq0}$: est le vecteur flux rotorique dans le repère de Park.

Dans le repère de Park, les flux et les courants soit liés par :

$$\begin{aligned} \varphi_{s\ dq0} &= [L_s] \quad [M_{sr}] \quad i_{s\ dq0} \\ \varphi_{r\ dq0} &= [M_{sr}] \quad L_s \quad i_{r\ dq0} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$L_s = \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - m_s \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r - m_r \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$M_{sr} = \begin{bmatrix} \frac{3.M_{max}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3.M_{max}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3.M_{max}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Dans la suite, on notera $\frac{3.M_{max}}{2} = M$

Si les grandeurs électriques triphasées sont équilibrées, alors les grandeurs homopolaires sont égales à zéro. Dès lors, les transformées de Park induisent des vecteurs comportant seulement les deux composantes directe d et q quadratures on écrit alors les équations matricielles précédentes (2.12), (2.13) comme suit :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \varphi_{sq} \cdot \omega_0 \\ V_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \varphi_{sd} \cdot \omega_0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_0 - \omega_r)$$

$$V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \varphi_{rd} \cdot (\omega_0 - \omega_r)$$

$$\omega_0 = \frac{d\theta_0}{dt} \quad (2.19)$$

ω_0 : La vitesse angulaire arbitraire.

Pour les équations de flux :

$$\begin{aligned}
\varphi_{ds} &= L_s I_{ds} + M I_{dr} \\
\varphi_{qs} &= L_s I_{qs} + M I_{qr} \\
\varphi_{dr} &= L_r I_{dr} + M I_{ds} \\
\varphi_{qr} &= L_r I_{qr} + M I_{qs}
\end{aligned} \tag{2.20}$$

$L_s = l_s - m_s$ L'inductance cyclique du stator.

$L_r = l_r - m_r$ L'inductance cyclique du rotor.

d. Calcul du couple électromagnétique [2]

On obtient la puissance instantanée absorbée par la machine en calculant la somme des produits de chaque f.é.m. avec son courant

$$P_m = e_{sd} \cdot i_{sd} + e_{sq} \cdot i_{sq} + (e_{rd} \cdot i_{rd} + e_{rq} \cdot i_{rq}) \tag{2.21}$$

En exprimant les f.é.m. et en factorisant par rapport aux vitesses angulaires, on obtient :

$$P_m = \varphi_{sd} \cdot i_{sq} + \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \cdot \omega_s + \varphi_{rd} \cdot i_{rq} + \varphi_{rq} \cdot i_{rd} \cdot \omega_r \tag{2.22}$$

En exprimant les flux en fonction des courants à partir de l'équation (II.69) on constate que :

$$\left(\varphi_{sd} \cdot i_{sq} + \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \right) = - \left(\varphi_{rd} \cdot i_{rq} - \varphi_{rq} \cdot i_{rd} \right) \tag{2.23}$$

Dans ces conditions, on obtient deux expressions pour le couple électromagnétique :

$$C_{em} = P \cdot \varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \quad \text{ou} \quad C_{em} = P \cdot \left(\varphi_{rd} \cdot i_{rq} - \varphi_{rq} \cdot i_{rd} \right) \tag{2.24}$$

Si l'on s'intéresse à l'expression utilisant les grandeurs au rotor on obtient.

$$C_{em} = P \cdot \left(\varphi_{rd} \cdot i_{rq} - \varphi_{rq} \cdot i_{rd} \right) \tag{2.25}$$

On pose :

$$C_{rd} = P \cdot \varphi_{rd} \cdot i_{rq} \quad C_{rq} = -P \cdot \varphi_{rq} \cdot i_{rd} \tag{2.26}$$

On écrit alors :

$$C_{em} = C_{rd} + C_{rq} \tag{2.27}$$

Si l'on utilise les grandeurs statoriques, l'expression du couple devient :

$$C_{em} = P \cdot \varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \tag{2.28}$$

On pose :

$$C_{sd} = P \cdot \varphi_{sd} \cdot i_{sq} \quad C_{sq} = -P \cdot \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \tag{2.29}$$

On écrit alors :

$$C_{em} = C_{sd} + C_{sq} \tag{2.30}$$

La première expression du couple (2.25) conduit à la commande vectorielle de la machine dite « à flux rotorique orienté », alors que la seconde expression (2.28) sera utilisée pour la commande dite « à flux statorique orienté ».

En dérivant la relation reliant l'angle statorique à celui du rotor suivante :

$$\theta_s = \theta_r + \alpha \quad (2.31)$$

On retrouve alors la relation entre la pulsation statorique ω_s et la pulsation ω_r rotorique :

$$\omega_r = \omega_s - p \cdot \Omega_{mec} \quad (2.32)$$

Ω_{mec} Est la vitesse de rotation de la machine.

L'expression du couple s'écrit comme suit :

$$C_{em} = \frac{m}{2} p \cdot \varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \quad (2.33)$$

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

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_r - C_{em} - C_{vis} \quad (2.34)$$

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.35)$$

Nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

$$\begin{aligned} C_{em} &= P \cdot (\varphi_{qr} \cdot I_{dr} - \varphi_{dr} \cdot I_{qr}) \\ C_{em} &= P \cdot (\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) \\ C_{em} &= P \cdot M \cdot I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{qs} \cdot I_{qr} \\ C_{em} &= P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\varphi_{dr} \cdot I_{qs} - \varphi_{qr} \cdot I_{ds}) \end{aligned} \quad (2.36)$$

e. Choix du référentiel

e.1. Référentiel lié au stator

C'est le référentiel le mieux adopté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_0}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (2.37)$$

e.2. Référentiel lié au rotor

C'est le choix quand on a besoin d'étudier des grandeurs rotoriques. Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\theta_0}{dt} = \omega \quad (2.38)$$

e.3. Référentiel lié au champ tournant

C'est pour l'étude de la commande. Dans ce cas $\omega_p = \omega_s$ (ω_s : vitesse de synchronisme) [13]

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit [20]:

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \varphi_{sq} \cdot \omega_s \\
 V_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \varphi_{sd} \cdot \omega_s \\
 V_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\
 V_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r)
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

On a donc :

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} \\
 V_{qs} &= R_s I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} - \omega_s L_s I_{ds} - \omega_s M I_{dr} \\
 V_{dr} &= R_r I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s L_r I_{qr} - \omega_s M I_{qs} + \omega_r L_r I_{qr} + \omega_r M I_{qs} \\
 V_{qr} &= R_r I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} - \omega_s L_r I_{dr} - \omega_s M I_{ds} - \omega_r L_r I_{dr} - \omega_r M I_{ds}
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

$$C_{em} = \frac{m}{2} p \cdot \varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \tag{2.41}$$

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_r - C_{em} - C_{vis} \tag{2.42}$$

2.2.2.c Modèle circuit électrique avec défaut

Nous définissons un défaut entre-spires comme étant un court-circuit entre les spires d'une même phase via une résistance dont la valeur définit la sévérité du défaut. En pratique, ce défaut peut être dû à une altération des isolants sur les fils du cuivre. Nous représentons une telle situation par un circuit supplémentaire liant une partie de la phase en défaut vers le point neutre comme indiqué sur la figure 2-7. [1]

Dans cette figure le bobinage de la phase as est subdivisé en deux parties : la partie saine (as1) et la partie court-circuitée (as2). La résistance de défaut (r_f) dont la valeur varie entre l'infini pour une machine saine et zéro pour un court-circuit franc, n'est qu'une représentation globale de phénomènes locaux qui peuvent être dispersés tout le long des bobines.

Le modèle couplé ainsi établi peut être combiné avec les équations mécaniques du système pour avoir une modélisation plus complète du comportement de la machine. Ce type de modélisation est coûteux en temps de calculs mais permet d'avoir une bonne idée de la dynamique de la machine lors de l'apparition d'un défaut.

On définit Le rapport de défaut cc qui décrit le nombre relatif de spires court-circuitées en cas de défaut entre-spires. Ce rapport varie entre 0 pour un fonctionnement sain et 1 pour le cas où toute la phase est court-circuitée. Nous avons donc :

$$cc = \frac{N_f}{N_s}$$

Où N_s est le nombre de spires par phase et N_f et le nombre de spires concernées par le défaut.

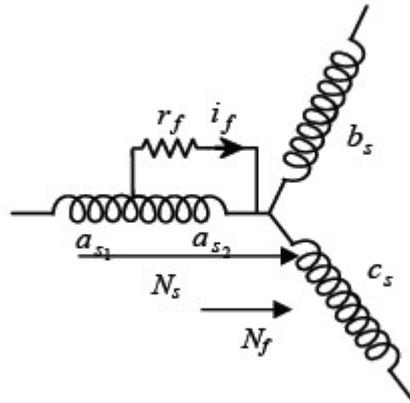


Figure 2.7. Schéma de principe d'un défaut entre spires sur une phase statoriques a_s .

2.2.2.d.1 Modèle de défaut dans le repère abc

On a :

$$N_f = N_{as2} = cc(N_{as1} + N_{as}) = cc N_s$$

Les résistances de la sous-bobine saine a_{s1} et de la sous-bobine court-circuitée a_{s2} sont notées par R_{a1} et R_{a2} respectivement ; elles sont proportionnelles au nombre de spires des parties concernées. Par conséquent, nous pouvons les exprimer en fonction de la résistance de phase R_a et le coefficient cc .

Nous avons donc :

$$R_{a1} = (1 - cc)R_a$$

$$R_{a2} = cc R_a$$

$$V_{as} = V_{as} + V_{as}$$

$$0 = V_{as} - r_f i_f$$

Dans le cadre des hypothèses émises au début de ce chapitre et en considérant la présence du défaut, les équations électriques des circuits statoriques et rotoriques peuvent être écrites sous la forme :

$$\begin{array}{l}
 \text{Stator} \\
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa1} \\ \varphi_{sa2} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa1} & R_s & 0 & 0 \\ V_{sa2} & R_s & 0 & 0 \\ V_{sb} & 0 & R_s & 0 \\ V_{sc} & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sa2} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \\
 \\
 \text{rotor} \\
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ra} & R_r & 0 & 0 \\ V_{rb} & 0 & R_r & 0 \\ V_{rc} & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_r \\ I_r \\ I_r \end{bmatrix}
 \end{array}$$

On définit les vecteurs des flux :

$$\begin{aligned}
 [\varphi_{sf}] &= L_{ssf} I_{sf} + [M_{srf}] I_r \\
 [\varphi_r] &= [M_{rs}] I_s + L_{rr} I_r
 \end{aligned}$$

$$R^s_{abcf} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & -R_{a2} \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ -R_{a2} & 0 & 0 & (R_{a2} + r_f) \end{bmatrix}$$

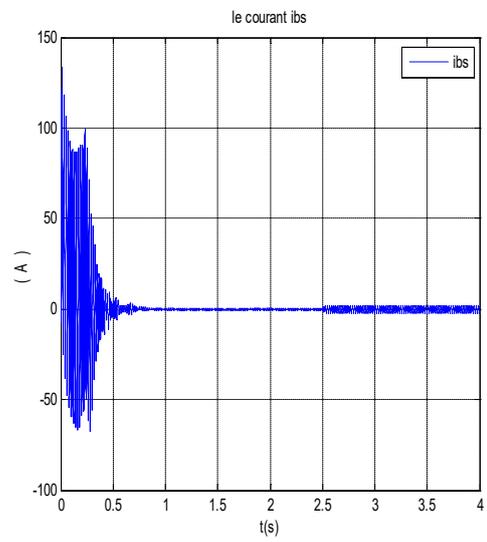
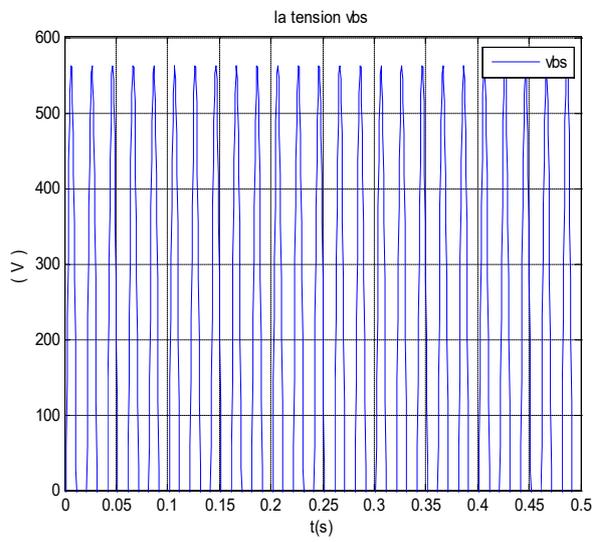
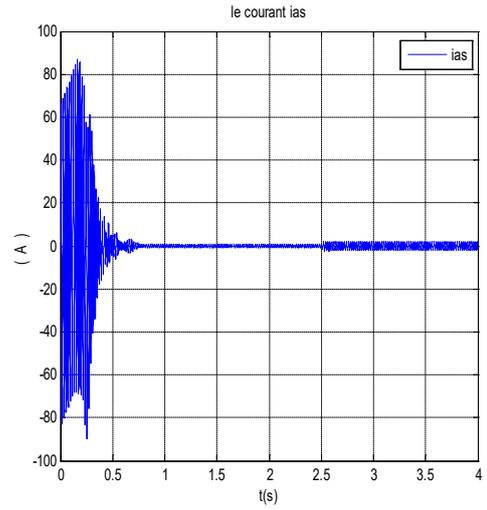
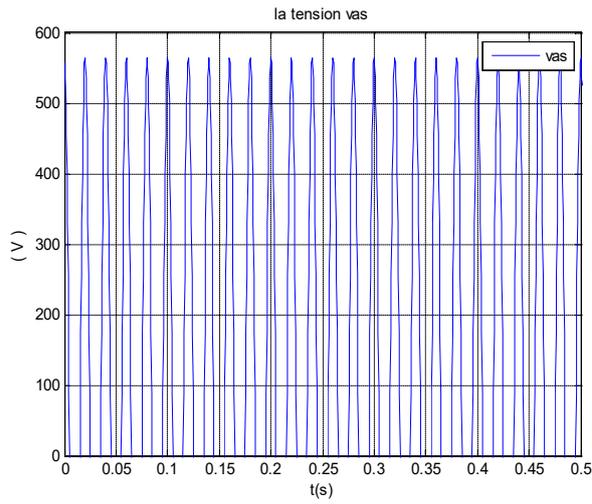
(43)

$$L^{ss}_{abcf} = \begin{bmatrix} L_s & M_{a1b} + M_{a2b} & M_{a1c} + M_{a2c} & -(L_{a2} + M_{a1a2}) \\ M_{a1b} + M_{a2b} & L_s & M_s & -M_{a2b} \\ M_{a1c} + M_{a2c} & M_s & L_s & -M_{a2c} \\ -(L_{a2} + M_{a1a2}) & -M_{a2b} & -M_{a2c} & L_{a2} \end{bmatrix}$$

$$M^{sr}_{abcf} = \begin{bmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) \\ M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) \\ M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta) \\ -M_{sr} \cos(\theta + \gamma_f) & -M_{sr} \cos(\theta + \gamma_f + 2\pi/3) & -M_{sr} \cos(\theta + \gamma_f - 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

2.3 Résultats de simulation

Nous avons introduit le modèle de la machine sous différents conditions sur matlab. Les figures de 2.7-2.10 représentent l'évolution du comportement de la machine asynchrone double alimentation. La figure 2.7 représente les courants et les tensions statoriques. Alors que la figure 2.8 représente les courants et les tensions rotoriques ainsi que la figure 2.9 montre la vitesse et l'angle teta de la MADA et enfin la figure 2.10 représente le couple d'un fonctionnement sain.



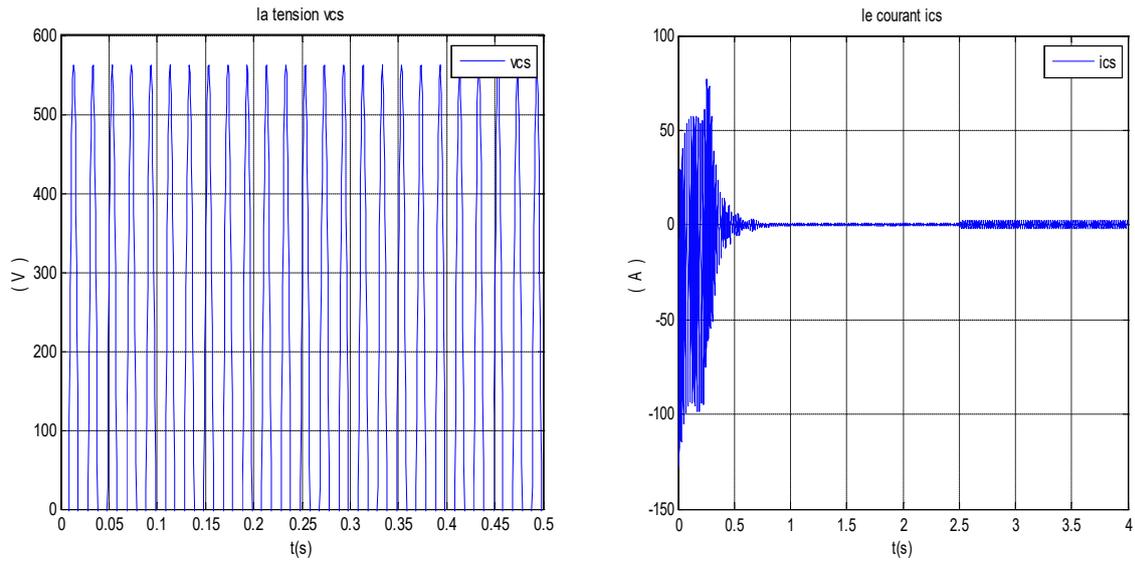
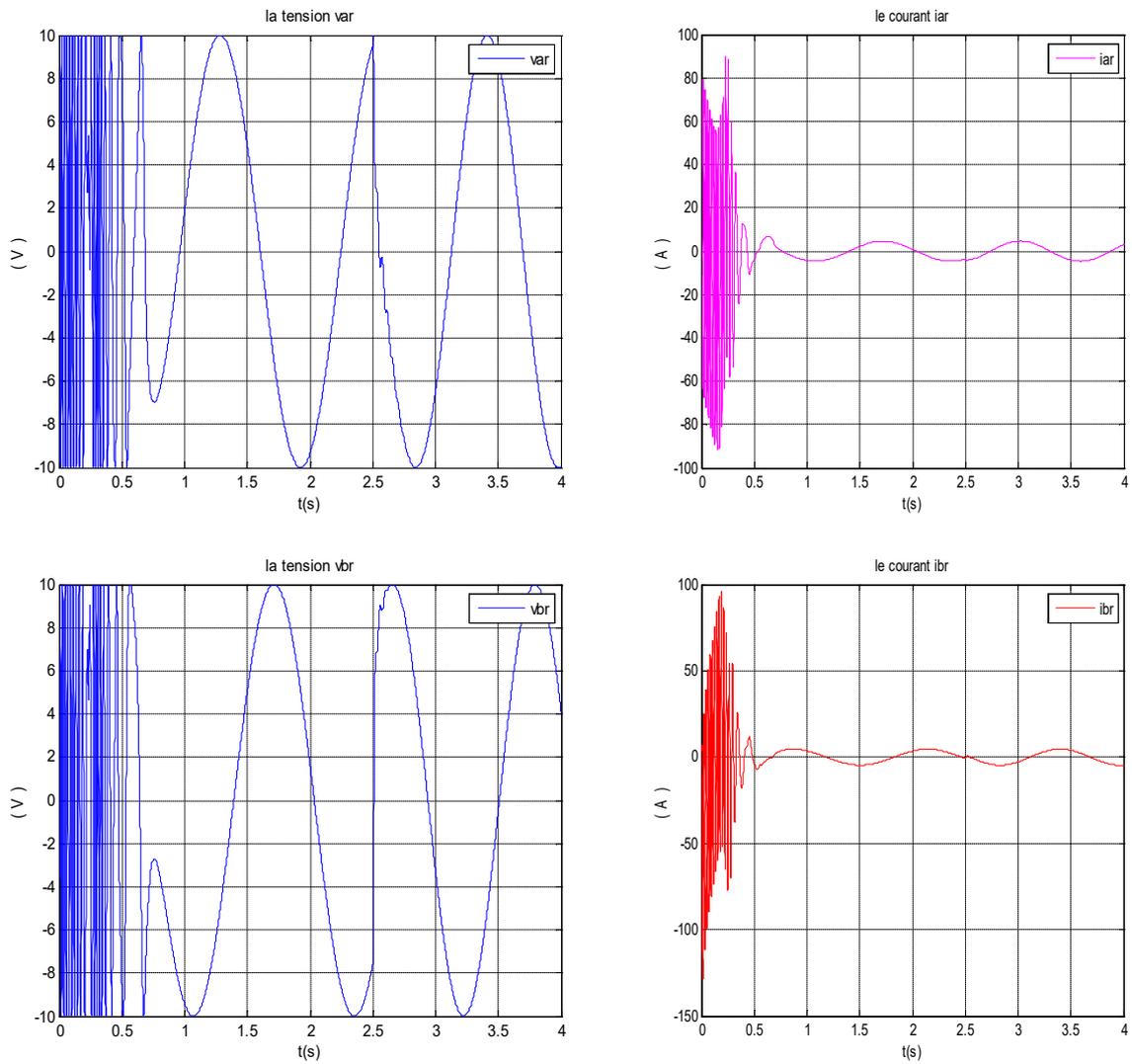


Figure 2.8. Les tensions et les courants statoriques de la MADA.



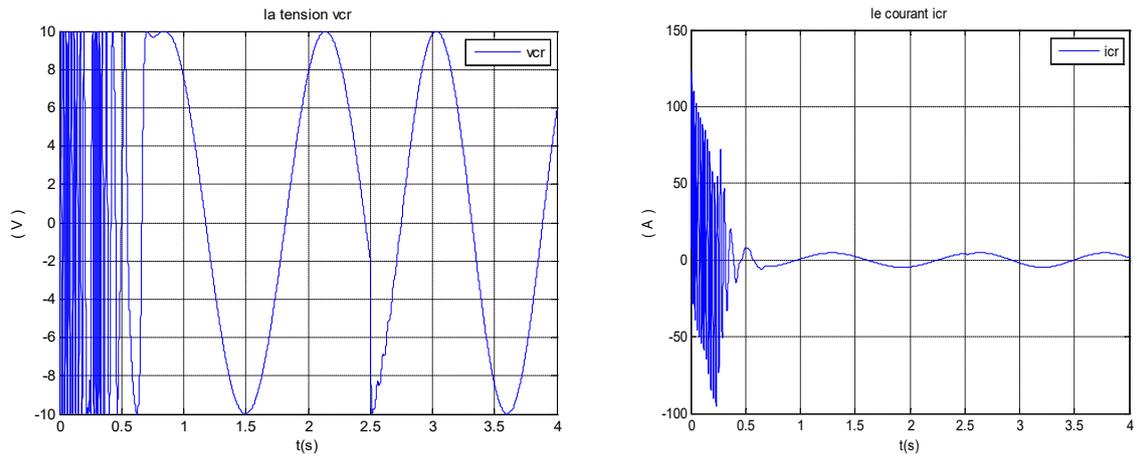


Figure 2.9. Les tensions et les courants rotorique de la MADA.

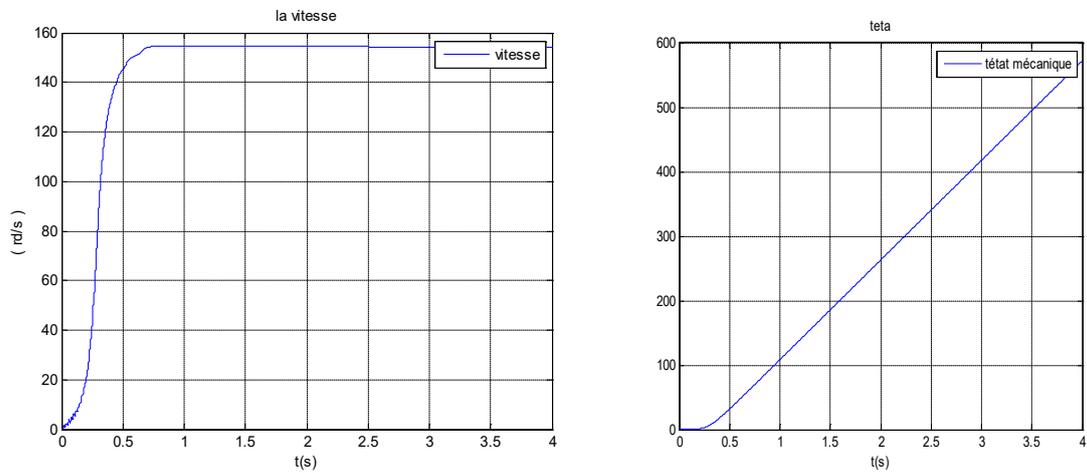


Figure 2.10 la vitesse de rotation et teta mécanique de la MADA.

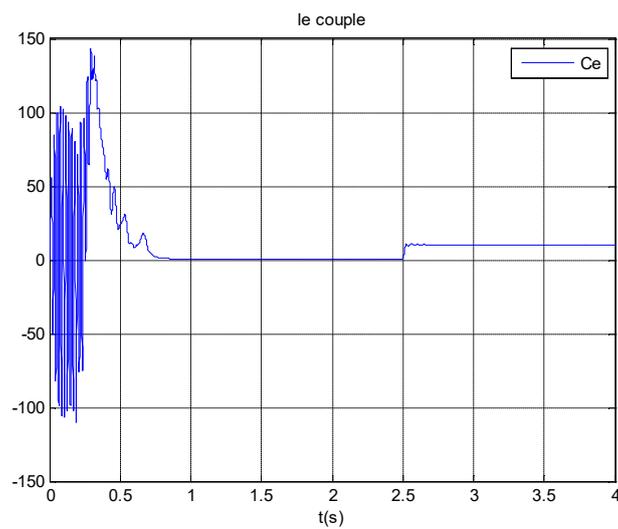


Figure 2.11 : le couple de la MADA.

Ce modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d,q)) lié au stator. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 15 KW.

Les figures précédentes sont obtenues pour le modèle de MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 1440 tr/min, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence de 50Hz et d'amplitude $V = 690$ V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 10V et une fréquence égale à la fréquence rotorique (ω_s).

Les résultats de simulation obtenus pendant le régime dynamique montrent l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environs 0,5s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques.

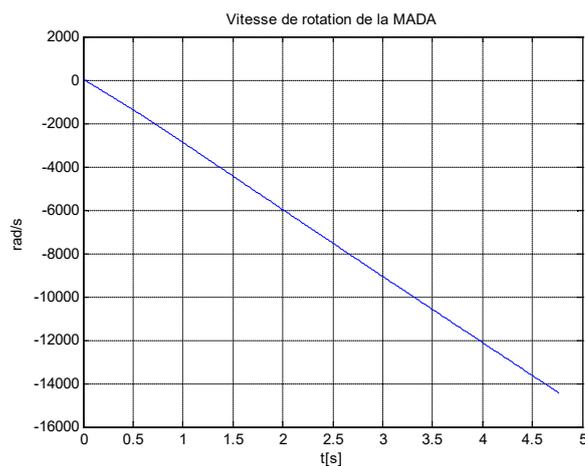


Figure 2.12. La vitesse de rotation de la MADA.

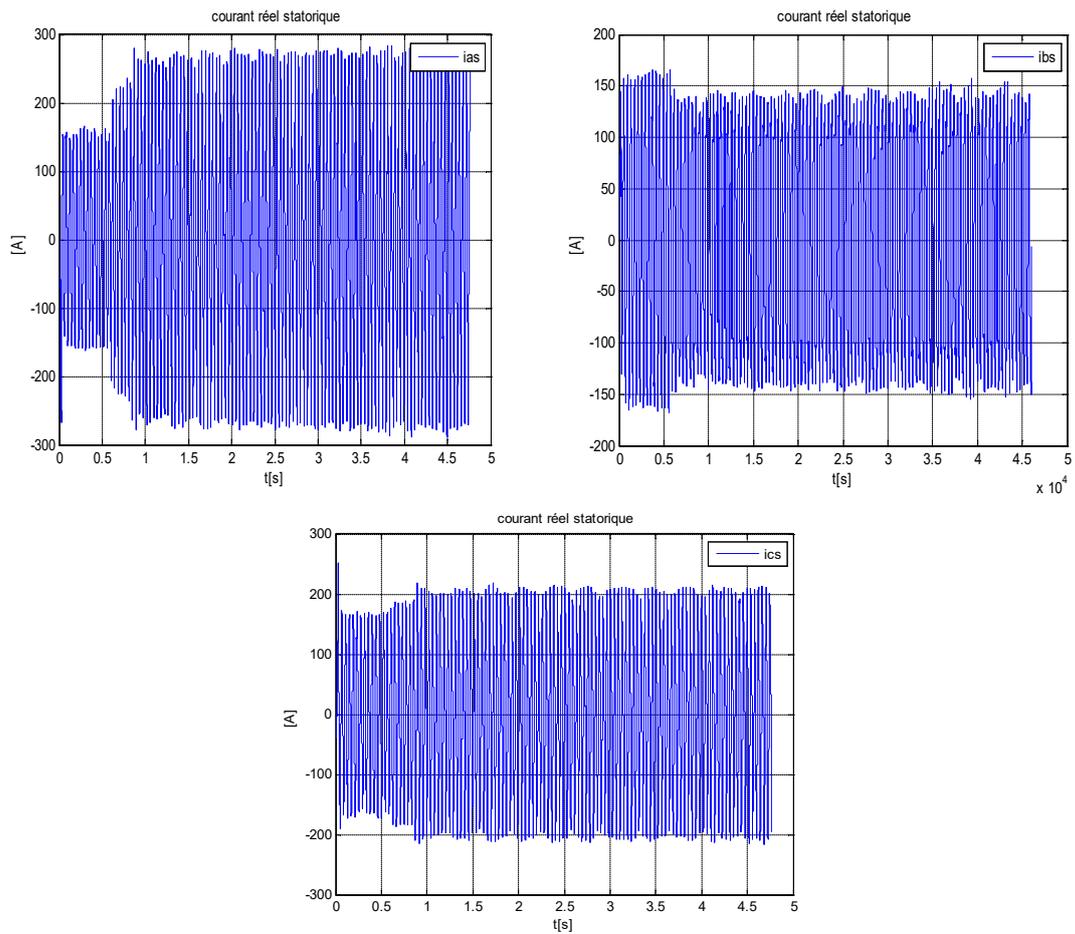
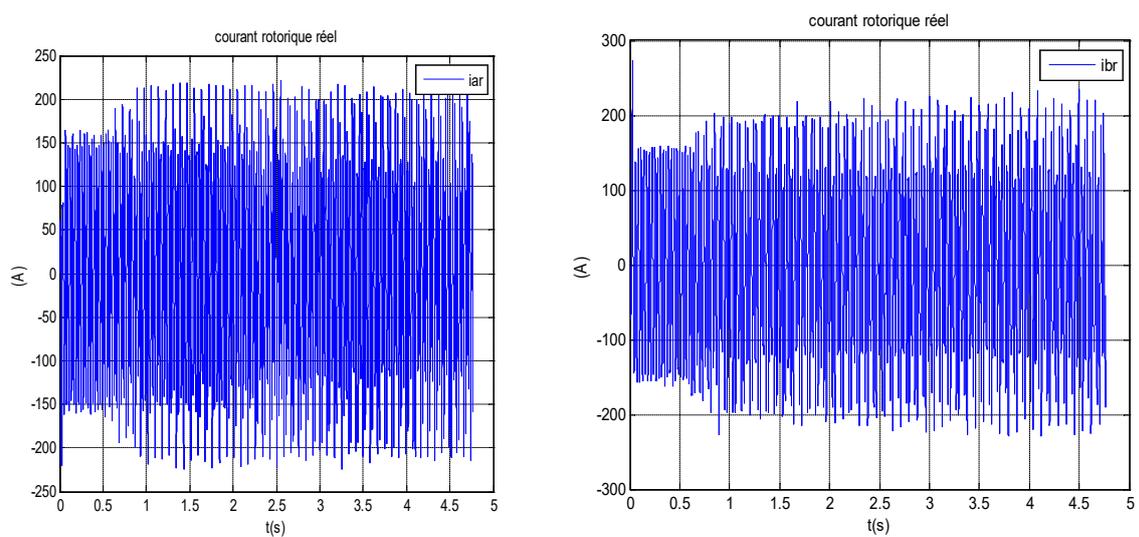


Figure 2.13. Les courants statoriques dans le plan (abc).



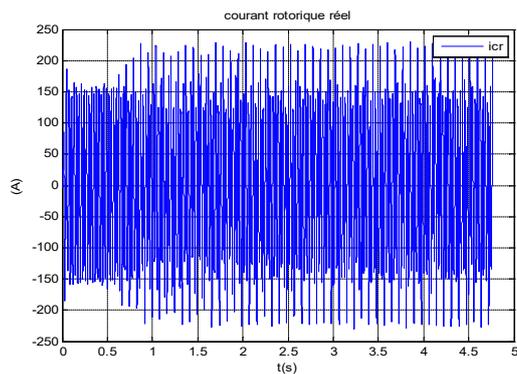


Figure 2.14. Les courants rotoriques dans le plan (abc).

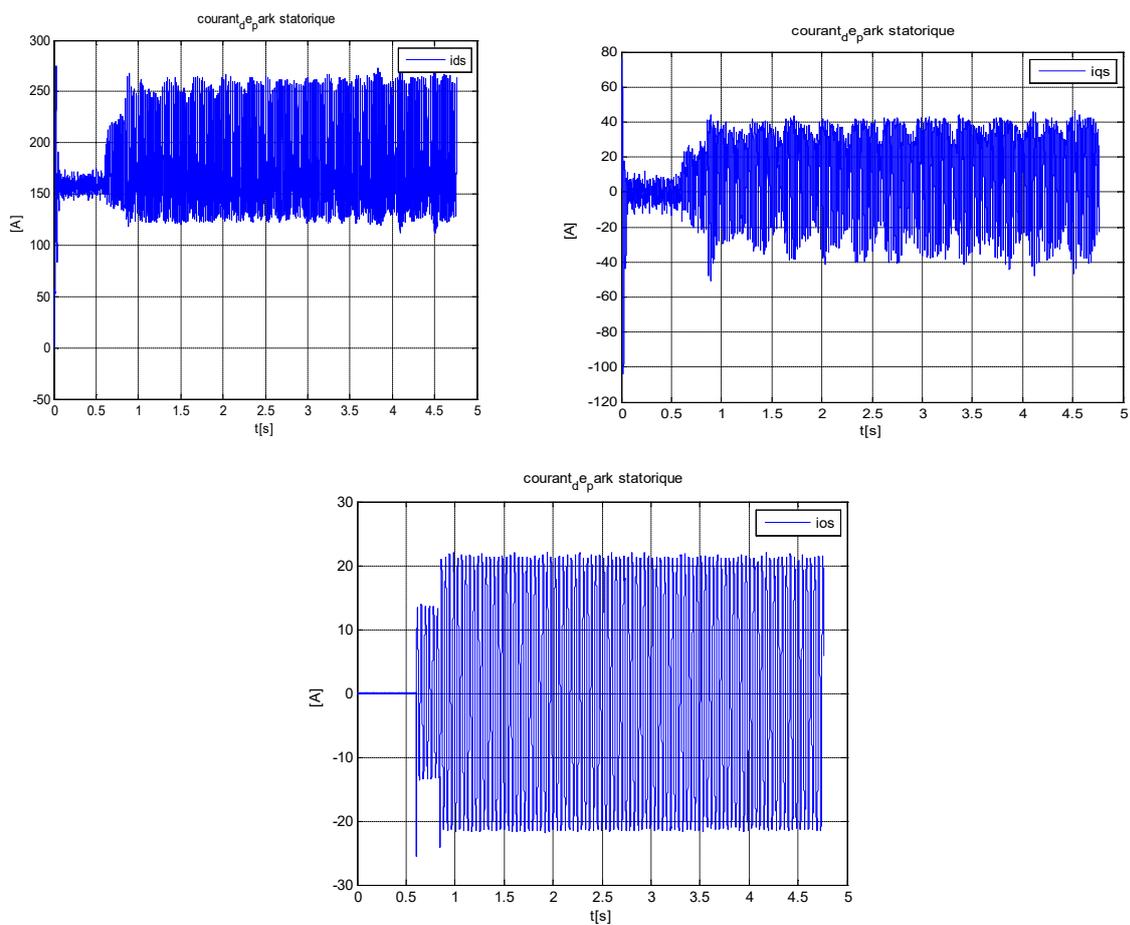


Figure 2.15. Les courants statoriques dans le repère Park.

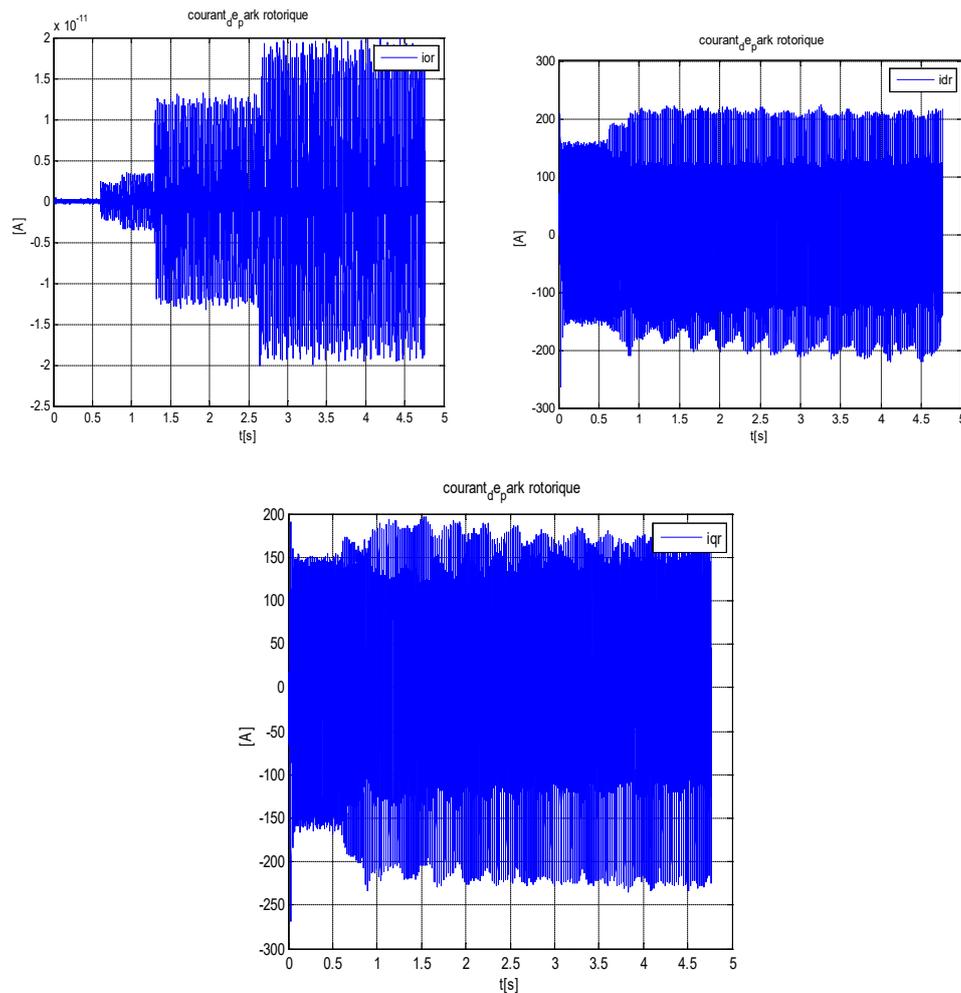


Figure 2.16. Les courants rotoriques dans le repère Park.

Dans les figures 2.12, 2.13, 2.16 nous avons présenté les résultats de simulation dans le cas des défauts de court circuit dans la phase (a).

Nous allons à présent étudier l'influence du taux de spires en défaut sur le comportement externe de la machine. Pour ce faire, nous effectuons un court-circuit de des spires d'une phase (phase a ici et $\alpha_{cc} = 0.09$) sachant que la résistance de défaut vaut $R_{cc} = 0.2\Omega$.

Le courant de défaut est pratiquement proportionnel au nombre de spires de sous bobine en défaut de court-circuit.

Nous constatons que c'est le courant de la phase a (phase en défaut) qui est le plus perturbé avec des maximum qui atteint 280 A.

Les deux autres phases ne sont influencées que par l'effet mutuel entre phases. En effet, pour une machine saine les courants sont équilibrés et à somme nulle.

L'analyse des figures précédentes montre l'influence du défaut sur la phase (a), on remarque que l'amplitude de courant statorique de phase (a) augmente par rapport les deux axes (b) et (c).

On conclure que la présence de défaut de court circuit statorique influant sur les performances de la MADA telle que le courant statorique et la vitesse.

Nous avons simulé ensuite le courant de défaut pour différentes valeurs des résistances de défaut $r_f=0.2\Omega$, $r_f=1\Omega$, $r_f=10\Omega$, $r_f=60\Omega$ les résultats obtenues sont présentées sur la figure 2.17

Nous constatons que les courants de phases ne sont plus équilibrés et que les perturbations des courants dépendent de la valeur de la résistance du défaut r_f . De même, la forme d'onde du courant i_f à travers la résistance de défaut (r_f) n'est pas parfaitement sinusoïdale.

Nous remarquons que le courant de défaut croît lorsque la résistance de défaut décroît mais aussi que le déséquilibre des courants de phase devient de plus en plus important lorsque cette résistance décroît

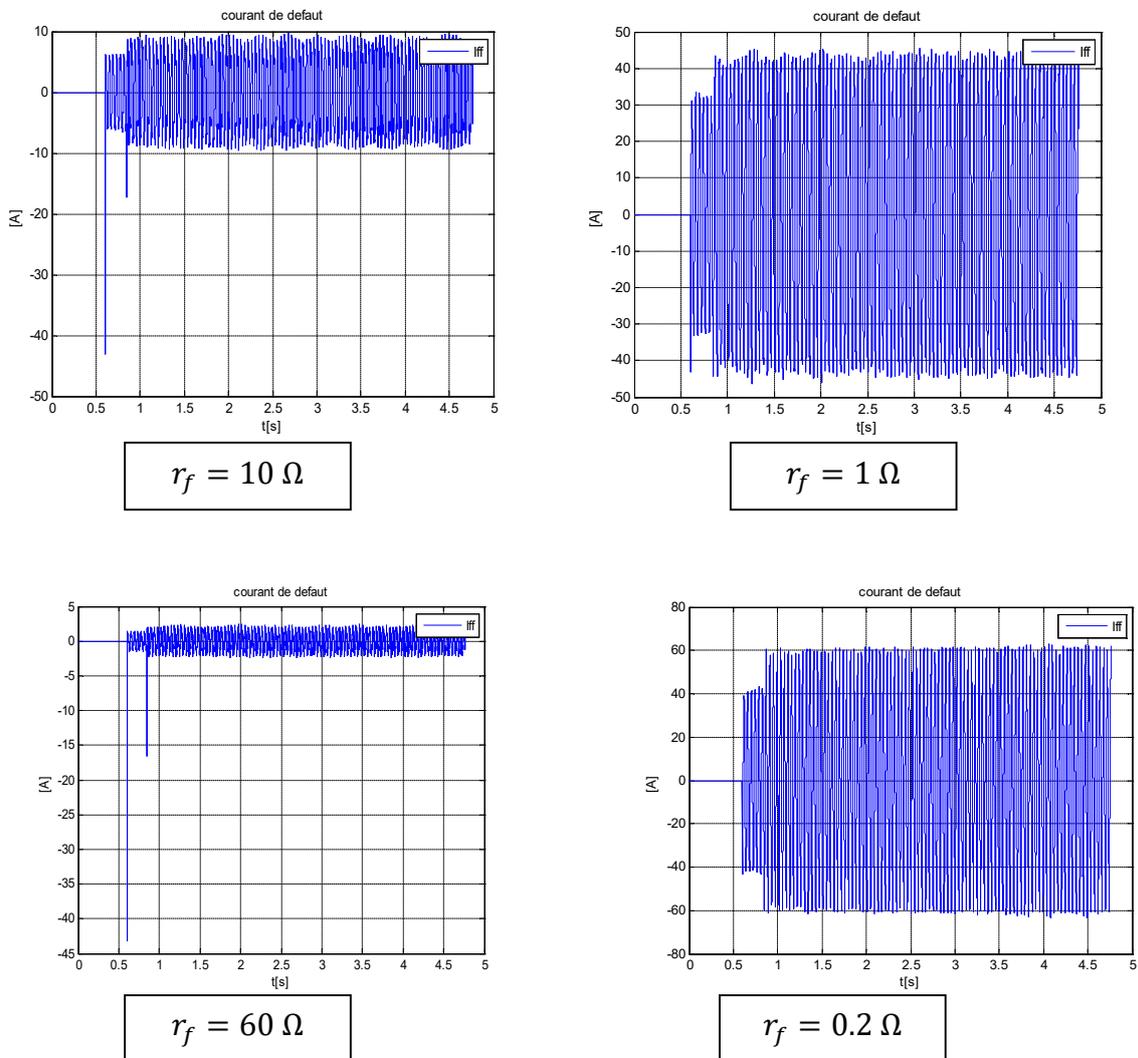


Figure 2.17. Les courants de défaut pour différentes valeurs de résistance de défaut.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la partie essentielle dans la conversion éolienne la MADA.

On a fait une modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices.

Nous avons constaté le modèle de la machine asynchrone à double alimentation sain et avec défaut de court circuit statorique entre spires dans la phase (a).

Un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Des résultats de simulation sont présentés.

Chapitre 3

Modélisation de la turbine éolienne

3.1 Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse sur la modélisation de la partie essentielle de la conversion d'énergie éolienne « la turbine ».

On a commencé par la modélisation de vent, puis une explication détaillé sur le modèle de multiplicateur et l'arbre de transmission.

On a fait une étude sur la stratégie de commande de la turbine.

Finalement on a vu une modélisation globale de différent composant de l'éolienne telle que l'onduleur et le redresseur MLI.

3.2 Modélisation de vent

L'énergie cinétique continue 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. Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. [4]

Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien, de nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés, 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 des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent. [4]

Donc la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes :

$$V(t) = V_0 + V_T(t) \quad (3.1)$$

- ✓ Une composante turbulente du vent (t) est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- ✓ Une composante lente V_0 ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné. [4]

3.3 Modélisation de la turbine

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la

vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. [26]

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure 3.1)[11]

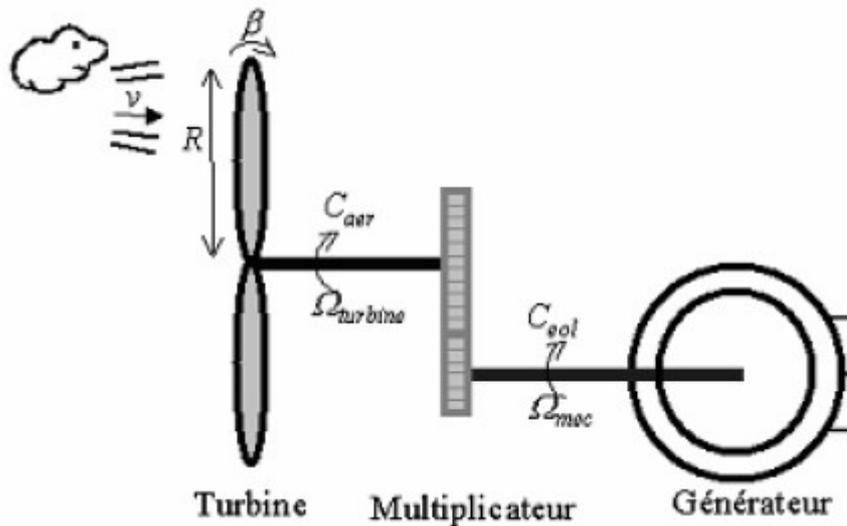


Figure 3. 1. Schéma de la turbine éolienne.

3.3.1 LOI DE BETZ

La loi de BETZ stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. [4]

D'après la théorie de Betz, la puissance du Vent est :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne} \rho V_v^3 \quad (3.2)$$

Avec :

$S_{éolienne}$: La surface balayée par l'éolienne.

ρ : La masse volumique de l'air (1.225Kg/m³).

V_v : La vitesse du vent.

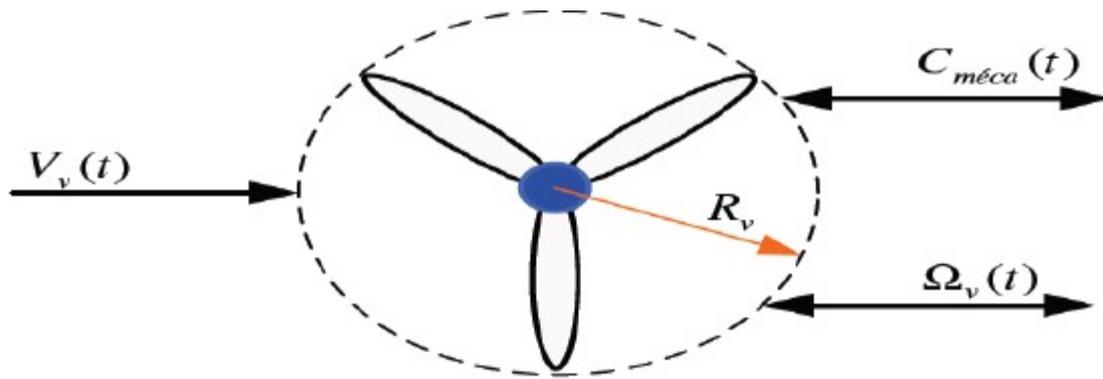


Figure 3. 2. Turbine tripale.

La surface balayée par éolienne $S_{\text{éolienne}}$ est donnée par la relation :

$$S_{\text{éolienne}} = \pi R^2 \quad (3.3)$$

Avec R est le rayon des pales de la turbine tripale.

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance fournie par le vent

$P_{\text{éolienne}}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p P_{\text{vent}} \quad (3.4)$$

Le coefficient C_p diffère pour chaque éolienne il dépend de l'angle d'inclinaison des pales β_i et du rapport de vitesse λ .

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_v(t)} \quad (3.5)$$

Avec :

R : Rayon des pales de l'éolienne.

Ω : vitesse de l'éolienne.

V_v : Vitesse de vent.

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques, qui dépendent de la vitesse spécifique λ et l'angle de calage β il est calculé à partir de l'équation suivante [27] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.00167 * (\beta - 2)) * \sin\left((\lambda + 0.1) * \pi / (18.5 - 0.3 * (\beta - 2))\right) - 0.00184 * (\lambda - 3) * (\beta - 2) \quad (3.6)$$

λ : La vitesse spécifique.

β : L'angle de calage (L'angle de l'orientation des pales).

La valeur optimale du coefficient de puissance est obtenue :

$$\lambda_{\text{opt}} = 6.41 \text{ et } C_{\text{opt}} = 0.5483$$

D'après les équations (3. 4) (3.6), nous aurons :

$$P_{\text{éol}} = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda) V_v^3 \quad (3.7)$$

Le couple éolien est déterminé par :

$$C_{\text{éol}} = \frac{P_{\text{éol}}}{\Omega} = \frac{1}{2} \rho S C_p \frac{V_v^3}{\Omega} \quad (3.8)$$

3.4 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes : [7]

$$C_g = \frac{G_{\text{éolienne}}}{G} \quad (3.9)$$

Avec :

C_g : Couple de la génératrice.

$G_{\text{éolienne}}$: Couple de l'éolienne.

G : Le coefficient de multiplication.

$$\Omega_{\text{mécanique}} = G \Omega_{\text{turbine}} \quad (3.10)$$

Avec :

$\Omega_{\text{mécanique}}$: Vitesse mécanique.

Ω_{turbine} : Vitesse de rotation de la turbine.

3.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ($C_{\text{mécanique}}$) appliqué au rotor de la génératrice. [7]

Nous avons :

$$J \frac{d\Omega_{\text{mécanique}}}{dt} = C_{\text{mécanique}} \quad (3.11)$$

J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des arbres et du multiplicateur.

Le couple mécanique, appliqué au rotor de la génératrice, est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor.

Nous avons :

$$C_{\text{mécanique}} = C_{\text{mul}} - C_{\text{em}} - C_f \quad (3.12)$$

Avec :

C_{mul} : Le couple issu du multiplicateur.

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f\Omega_{m\acute{e}canique} \quad (3.13)$$

Nous avons:

Avec :

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du multiplicateur C_{mul} et le couple électromagnétique C_{em} . [7]

3.6 Stratégies de commande de la turbine éolienne

Dans le domaine de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable, on distingue deux régions: en dessous et au dessus de la vitesse nominale du vent. La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice. Il est alors important d'étudier le rôle et les effets du système de commande en fonctionnement à charge partielle, c'est à dire en dessous de la puissance nominale. [27]

3.6.1 La commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale

Dans cette zone de fonctionnement, la commande a pour principaux objectifs de maximiser l'énergie capturée du vent et de minimiser les efforts subis par le dispositif d'entraînement. Pour maximiser la capture de l'énergie du vent, ces deux variables doivent être maintenues à leurs valeurs optimales afin d'assurer la valeur maximale de $C_{p\ opt}(\lambda_{opt}, \beta_{opt})$. On fixe donc l'angle de calage à sa valeur optimale β_{opt} . La vitesse spécifique à sa valeur optimale λ_{opt} . [27]

3.6.2 Caractéristique de puissance

La caractéristique Puissance-Vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones (Figure 3.3).

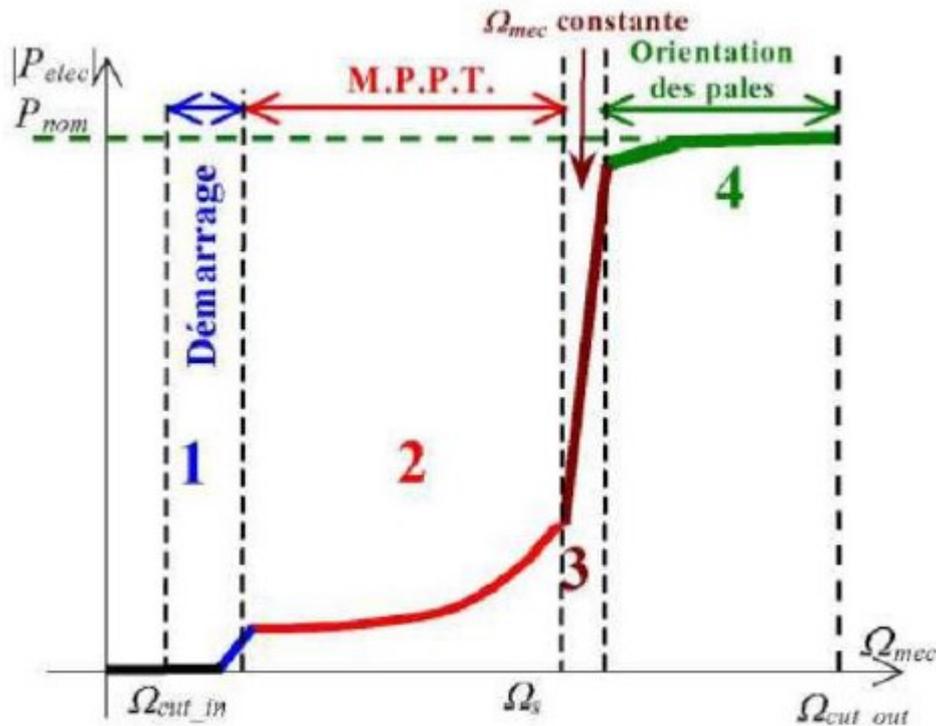


Figure 3.3. Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne à grande puissance.

- ✓ **Zone 1 :** C'est la zone de démarrage de la machine ; elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{cut-in} . (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle l'éolienne a démarré).
- ✓ **Zone 2 :** Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué « MPPT » (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale ($\beta=2^\circ$) afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale.
- ✓ **Zone 3 :** Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90 % de la puissance nominale P_{nom} .

- ✓ **Zone 4** : 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 : Le Pitch contrôle. 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. [7], [16], [4]

3.6.3 Commande en dessous de la puissance nominale (optimisation de la puissance)

Dans cette zone, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le système de contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de la valeur optimale de la vitesse spécifique $\lambda = \lambda_{opt}$. Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale $C_{p max}$. La technique d'optimisation de la puissance utilisée dans cette zone de fonctionnement des éoliennes à vitesse variable est la technique de la MPPT.

3.6.3.a Principe de la MPPT

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Pour agir sur la vitesse de rotation de la turbine Ω_T , on s'intéresse au sens de variation de la grandeur $\frac{dP}{d\Omega_T}$. Ce gradient vaut zéro lorsque l'on a atteint le maximum de la puissance, point que l'on recherche. On le déduit à partir de l'équation :

$$\frac{dP}{d\Omega_T} = \frac{dP}{dt} \frac{dt}{d\Omega_T} \quad (3.14)$$

3.7 Modélisation globale de la chaîne de conversion de l'éolienne basée sur la MADA

Après avoir présenté le principe de la conversion d'énergie éolienne, et modéliser les parties essentielles dans la chaîne de conversion éolienne, qui sont la turbine et la génératrice ; nous attachons dans la suite, à présenter la structure globale de cette chaîne avec une modélisation détaillée des différents éléments et une simulation comportementale du système complet sur le plan électrique et énergétique. [7]

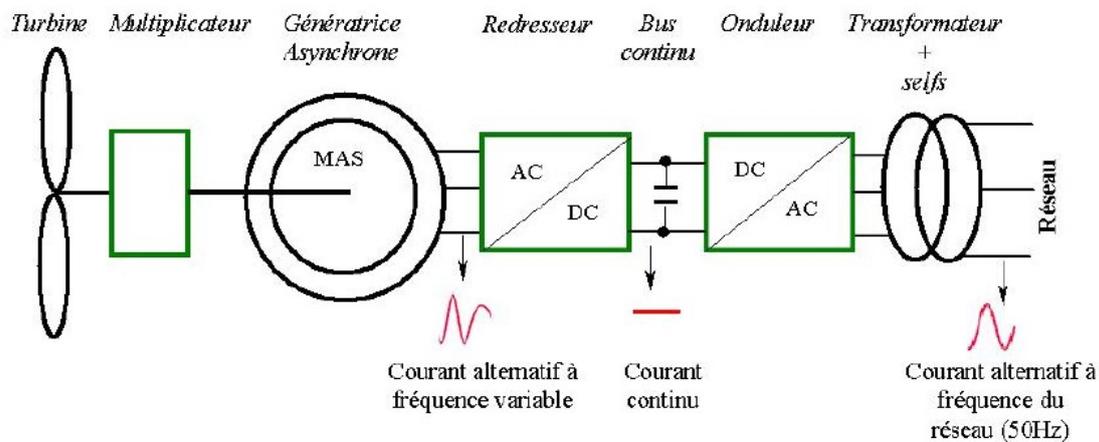


Figure 3.6. structure globale d'une chaîne de conversion de l'éolienne.

3.7.1 Alimentation utilisant des convertisseurs MLI

3.7.1.a Les Techniques de commande des convertisseurs MLI

La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions (ou courants) à partir d'une source à fréquence et à tension fixe (en général une tension continue). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement. [2]

Les paramètres essentiels de **MLI** sont par conséquent:

- ✓ La fréquence de modulation : f_m .
- ✓ L'indice de modulation: $m = \frac{f_m}{f_s}$.

Où f_s est la fréquence des fondamentaux des grandeurs de sortie de l'onduleur.

- ✓ Taux de modulation (r) qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p): $r = \frac{V_{ref}}{U_p}$ [7]

✓ Principe de fonctionnement de MLI

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de commander la tension de sortie de l'onduleur en amplitude et en fréquence à partir des signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur tout en limitant l'effet des harmoniques.

Le principe de la MLI sinus-triangle repose sur la comparaison entre un signal triangulaire de haute fréquence appelé la modulante et un signal de référence appelé la porteuse. La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

L'emploi de la technique MLI pour déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs permet de régler de manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions sur chaque période de commutation. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés par la comparaison de trois ondes de référence avec une onde porteuse qui fixe la fréquence de commutation. Cette comparaison fournit trois signaux logiques f_a , f_b et f_c qui valent 1 quand les interrupteurs du côté haut sont en conduction et ceux de côté bas sont bloqués et valent 0 dans le cas contraire. A partir de ces signaux l'électronique de commande élabore les signaux de commande des interrupteurs.

Si les références forment un système triphasé équilibré de grandeurs sinusoïdales on obtient à la sortie de l'onduleur des ondes de tensions dont les valeurs moyenne forment elle aussi un système triphasé équilibré.

3.7.2 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors. Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI). Dans ce travail, on commande l'onduleur de tension par la technique à MLI.

L'onduleur est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables. Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la

fermeture. [7] Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits.

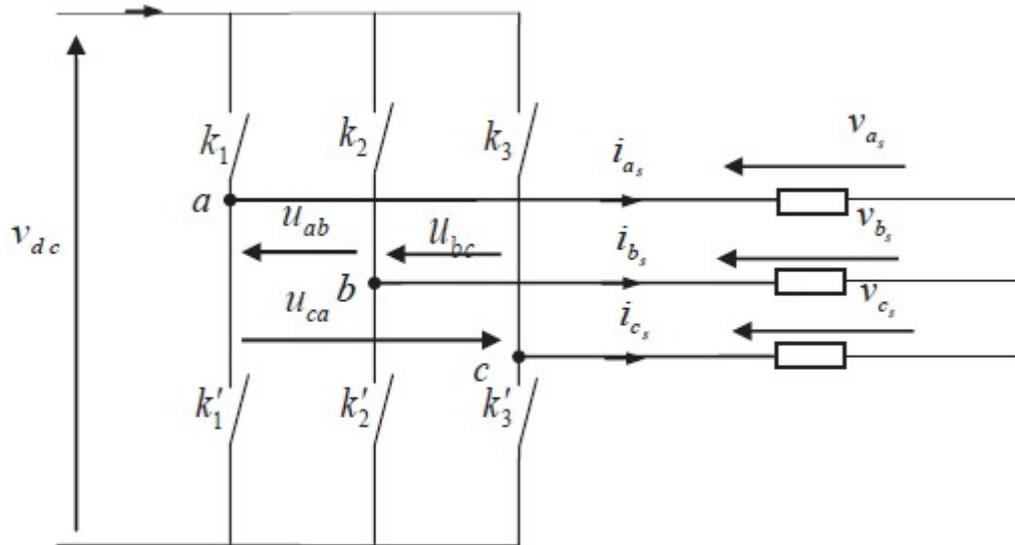


Figure 3.7. Schéma d'un onduleur de tension.

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique F qui détermine ses états de conduction :

$$F_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } k_1 \text{ fermé et } k'_1 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } k'_1 \text{ fermé et } k_1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$F_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } k_2 \text{ fermé et } k'_2 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } k'_2 \text{ fermé et } k_2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$F_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } k_3 \text{ fermé et } k'_3 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } k'_3 \text{ fermé et } k_3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

Ainsi les tensions de ligne sont données par :

$$u_{ab} = v_{as} - v_{bs} = v_{dc}(F_1 - F_2) \quad (3.29)$$

$$u_{bc} = v_{bs} - v_{cs} = v_{dc}(F_2 - F_3) \quad (3.30)$$

$$u_{ca} = v_{cs} - v_{as} = v_{dc}(F_3 - F_1) \quad (3.31)$$

Dans l'hypothèse on a les tensions v_{as}, v_{bs}, v_{cs} forment un system de tensions triphasées équilibrées alors De (3.29)-(3.31) en trouve

$$v_{as} = \frac{v_{dc}}{3} (2F_1 - F_2 - F_3)$$

De (3.29)-(3.30) en trouve

$$v_{bs} = \frac{v_{dc}}{3} (2F_2 - F_1 - F_3)$$

De (3.30)-(3.31) en trouve

$$v_{cs} = \frac{v_{dc}}{3} (2F_3 - F_1 - F_2)$$

Donc :

$$\begin{pmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{pmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix}$$

v_{dc} : C'est la tension d'alimentation continue de l'onduleur.

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie. [7],[2]

3.7.3 Modélisation du redresseur triphasé double alternance à diodes [7]

Le redresseur est un convertisseur « alternatif/continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant à partir d'une source alternative.

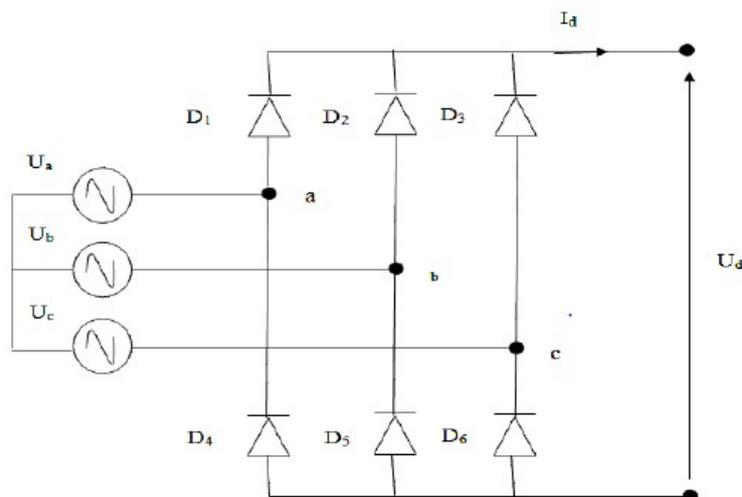


Figure 3.8. Redresseur triphasé double alternance

Ce redresseur comporte trois diodes (D1, D2, D3) à cathode comme assurant l'aller du courant I_d et trois diodes (D4, D5, D6) à anode comme assurant le retour du courant I_d . le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$U_a(t) = V_m \sin(2\pi ft)$$

$$U_b(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$U_c(t) = V_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right)$$

V_m : est l'amplitude maximale de la tension composée.

Et si on néglige d'empatement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme Suit.

$$U_{rd} = \max[U_a(t), U_b(t), U_c(t)] - \min[U_a(t), U_b(t), U_c(t)] \quad (3.33)$$

La valeur moyenne de la tension redressée :

$$V_{cmoy} = \frac{6}{T} \int_{-T/12}^{T/12} V_c dt$$

Facteur de forme :

La valeur du facteur de forme caractérise la tension redressée. Plus cette valeur est proche de l'unité, plus la tension obtenue est voisine d'une grandeur continue. Ce coefficient sert à comparer des montages redresseurs différents entre eux.

Par définition, on nomme facteur de forme le rapport :

$$F = \frac{U_{eff}}{U_0}$$

3.7 Résultats de simulation

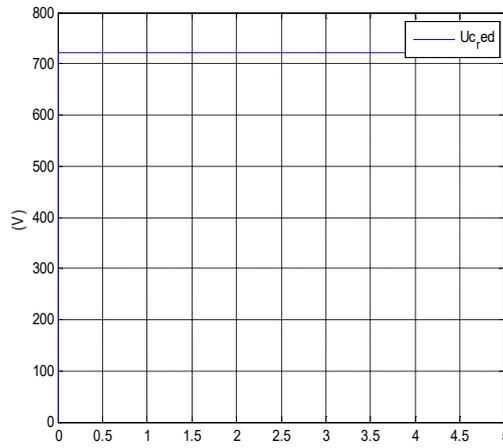


Figure 3.9. La tension de redresseur.

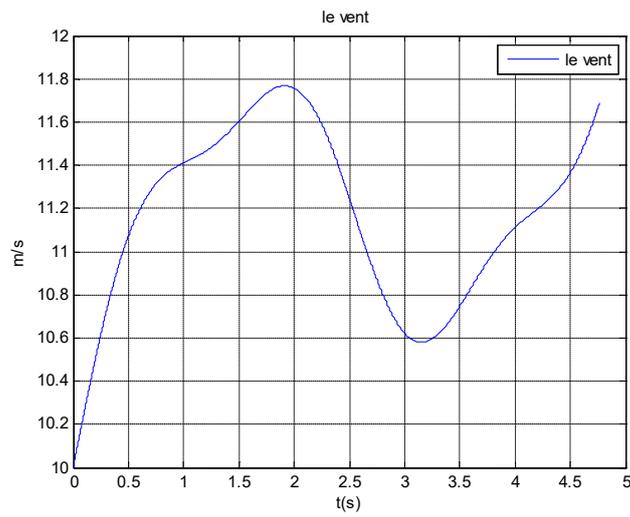


Figure 3.10. La vitesse de vent.

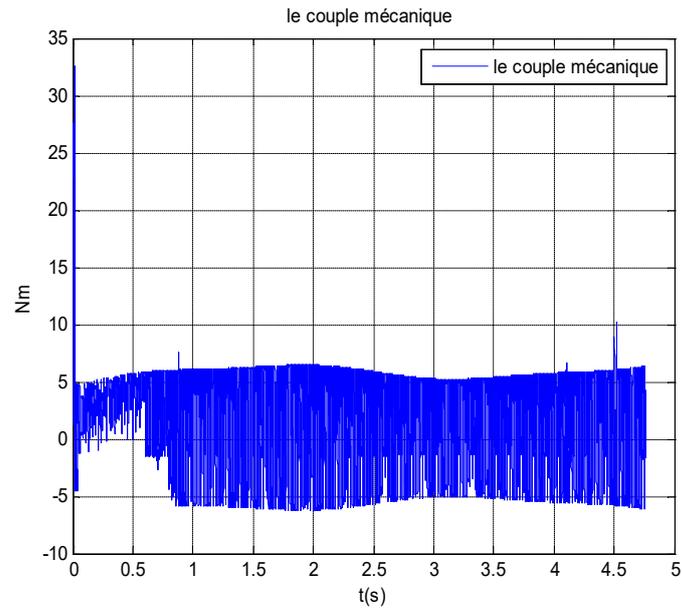


Figure 3.11. Le couple mécanique.

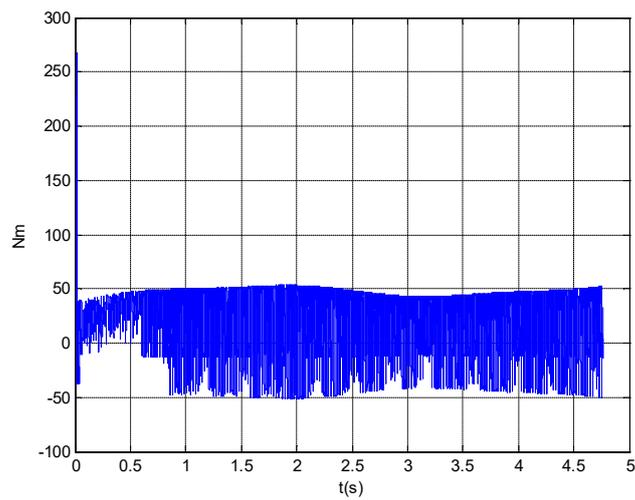


Figure 3.12. Le couple de la turbine.

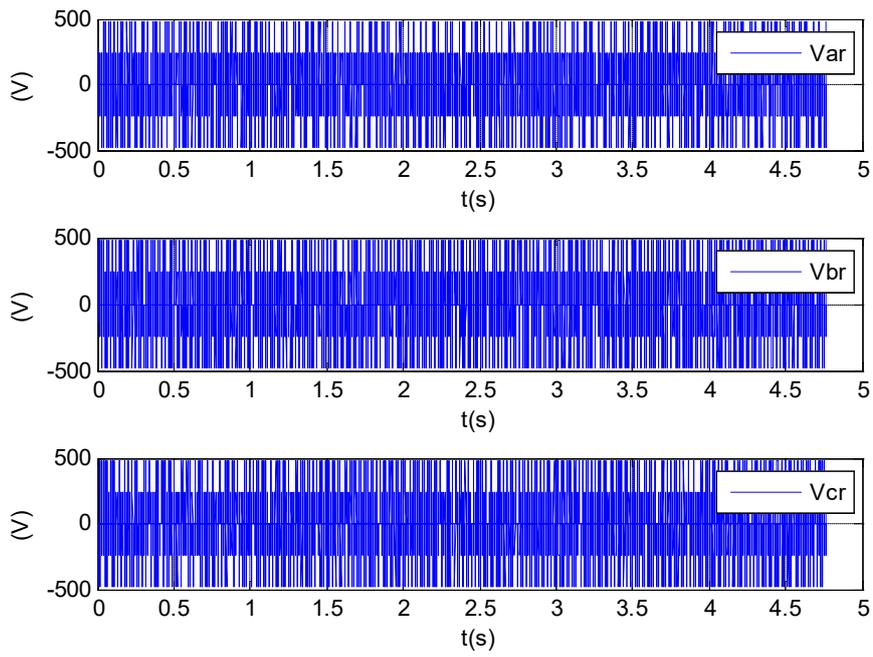


Figure 3.13. Les tensions de l'onduleur.

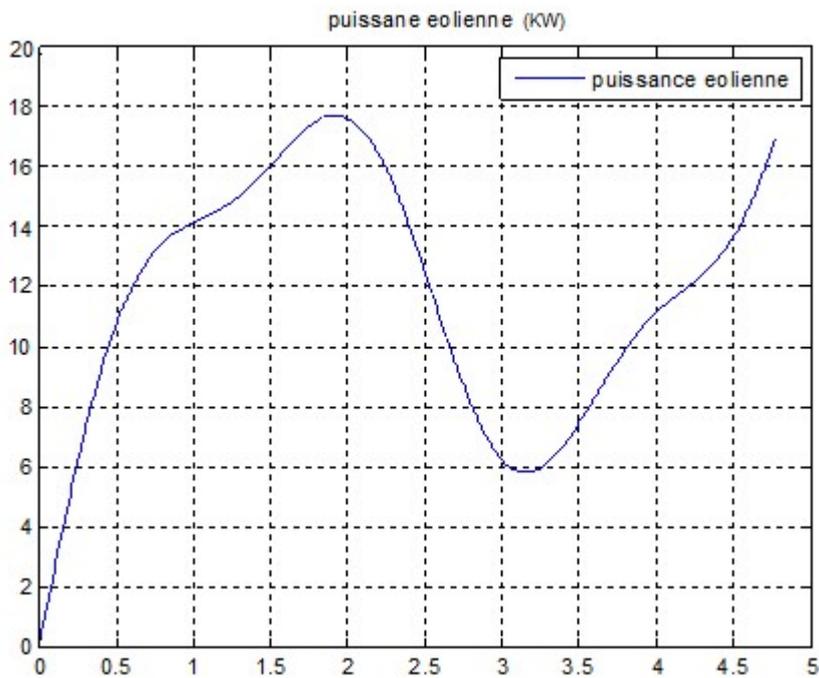


Figure 3.14. La puissance éolienne.

Les résultats de simulation correspondant montrent que les variations de la puissance éolienne sont adaptées à la variation de la vitesse du vent.

3.8 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre la modélisation du premier élément de la chaîne de conversion d'énergie éolienne qui est la turbine.

L'énergie mécanique issue de la turbine serait appliquée à l'arbre de la génératrice afin de produire de l'énergie électrique.

Nous avons donné aussi une vue pour les stratégies de commande d'une turbine pour extraire le maximum d'énergie (technique MPPT).

Nous parlons aussi sur la modélisation des composants de la chaîne de conversion telle que l'onduleur et le redresseur.

Dans le chapitre suivant nous allons voir le diagnostic du défaut par l'analyse spectrale en

Table des matières

Chapitre 4

*Détection des défauts par l'analyse
spectrale(FFT)*

4.1 Introduction

La découverte de la Transformation Rapide de Fourier en 1965 par Cooley et Tukey a été d'une importance majeure pour le traitement du signal. [23]

La FFT (Fast Fourier Transform) est une méthode d'analyse du signal la plus utilisée et la mieux établie pour le diagnostic de défauts.

Dans ce chapitre on présente l'analyse spectrale du courant statorique en utilisant la transformé de Fourier rapide (FFT) pour la surveillance d'une machine asynchrone à double alimentation.

4.2 Système de surveillance

Le but de la surveillance en ligne (détection, localisation et diagnostic des défaillances) est de déterminer, à partir des informations prélevées en temps réel, si le système fonctionne correctement ou présente des anomalies, appelées défaillances, susceptibles de compromettre la réalisation de sa mission. [2]

4.2.1 Les fonctions de la surveillance

4.2.1.a Détection

Un test de détection a pour finalité de vérifier si un ensemble d'informations représentatives de l'état d'un système physique est cohérent avec la connaissance d'un comportement donné qui peut être normal ou anormal résultat de la comparaison produit un écart. Cet écart sera comparé à des seuils fixés à priori. Si le seuil de la détection est trop petit, il peut y avoir des fausses alarmes. Si le seuil est trop grand, on aboutit à des manques à la détection. [2]

4.2.1.b Diagnostic

On distingue trois étapes :

Localisation : détermine-le sous système fonctionnel à l'origine de l'anomalie et progressivement affine cette détermination pour désigner l'organe ou dispositif élémentaire défectueux.

Identification : détermine les causes qui ont engendré la défaillance constatée.

Explication : justifie les conclusions du diagnostic. [2]

4.2.1.c La reprise

Englobe la fonction de recouvrement et de décision, celle ci détermine un état accessible pour le retour au nouveau fonctionnement normal et les différentes actions correctives modifiant la configuration du procédé et de la commande. [2]

4.3 La surveillance de la machine asynchrone à double alimentation

4.3.1 Approche signal

Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence des caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. La première étape dans cette approche concerne la modélisation des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral. L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, les vibrations. Dans la littérature, sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par traitement du signal. [2]

4.3.1.a Analyse spectrale

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts au rotor des machines asynchrones à double alimentation, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone à double alimentation consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit les grandeurs électriques (les courants de ligne statoriques), soit les grandeurs mécaniques (vibration,...).

Cette technique permet une surveillance rapide et peu onéreuse. Cependant, elle nécessite une analyse manuelle par un expert en surveillance des machines électriques. [2]

4.3.2 Analyse spectral du courant statorique par la FFT

Chaque défaut dans la MADA va donner naissance à une influence remarquable surtout sur le courant statorique par la modulation de son amplitude à la fréquence. [2]

4.3.2.a Transformée de Fourier Rapide (FFT)

On considère le signal $X(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi f t} dt \quad (4.1)$$

Son inverse est donnée par :

$$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f)e^{-2\pi f t} df \quad (4.2)$$

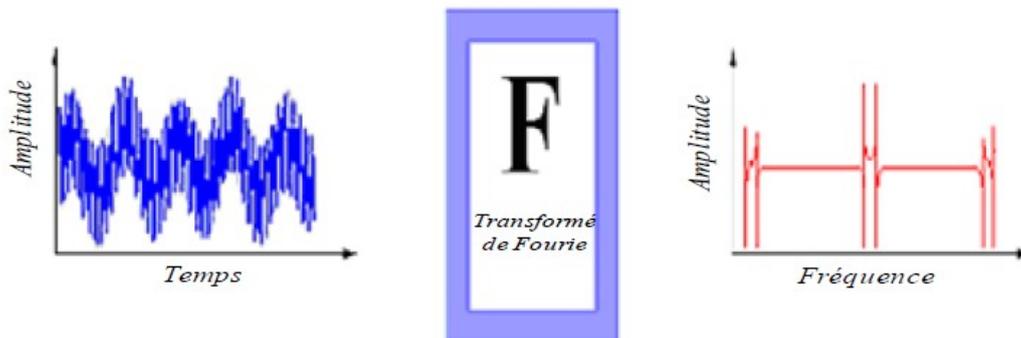


Figure 4.1. Représentation temporelle vers fréquentielle.

Sa transformée de Fourier discrète de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par :

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{K=N-1} x(kT) e^{-\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (4.3)$$

Son inverse est donnée par :

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{K=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (4.4) \quad [22]$$

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égale à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de $\frac{N}{\log_2(N)}$. [24]

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal $x(t)$. En effet, la FFT décompose le signal $x(t)$ sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux $\{e^{2\pi f_k T}\}_{f \in \mathbb{R}}$ [22]

• Théorème de Fourier

Toute fonction continue est décomposable en série de Fourier. Si de plus cette fonction est périodique de période T , le nombre de termes de la décomposition est fini. [23]

On peut alors écrire une fonction périodique de période T , de pulsation $\omega = \frac{2\pi}{T}$, de fréquence $f = \frac{1}{T}$, par une somme de fonctions sinusoïdales (ou cosinusoïdales) appelée "Série de Fourier" :

$$x(t) = x_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \cdot \sin(2\pi f_n t + a_n) \quad (4.5)$$

Où

x_0 : Valeur moyenne, ou composante continue, la composante de fréquence nulle.

$x_1 = X_1 \sin(2\pi f t + a_1)$: Fondamental, l'harmonique de rang 1.

$x_n = X_n \sin(2\pi n f t + a_n)$: Harmonique de rang n , la composante de fréquence $n f$ et $n > 1$.

L'amplitude et la phase des harmoniques sont calculée à l'aide des relations suivantes :

$$X_n \sin(2\pi n f t + a_n) = A_n \cos(2\pi n f t) + B_n \sin(2\pi n f t) \quad (4.6)$$

Les coefficients de Fourier A_n et B_n se calculent comme suit :

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi n f t) dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi n f t) dt$$

$$x_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \frac{A_0}{2}$$

Ou

$$a_n = \arctg\left(-\frac{B_n}{A_n}\right)$$

Dans la pratique cela veut dire que l'on peut décomposer la fonction en une somme de sinus (cosinus) de périodes multiples de la période de base de la fonction. Les coefficients représentent le niveau "énergétique de chacune des fréquences élémentaires".

L'application principale de l'analyse FFT est donc la mise en évidence des périodicités du signal, le calcul de "l'énergie" contenue dans le signal pour chacune des fréquences et d'observer les signaux qui ne sont pas périodiques. Elle est la plus utilisée pour représenter un phénomène temporel dans le domaine fréquentiel.

La plupart des signaux physiques que l'on doit traiter et analyser sont analogiques par nature (courant statorique, dans notre cas). En fait, seule la représentation numérique du signal est utilisée pour réaliser les calculs voulus. [23]

4.3.2.b Résultats de la simulation

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée, car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone à double alimentation.

L'objectif de cette partie consiste à choisir le meilleur signal pour le traiter entre les signaux de puissance, et du courant statorique.

- Etat sain :

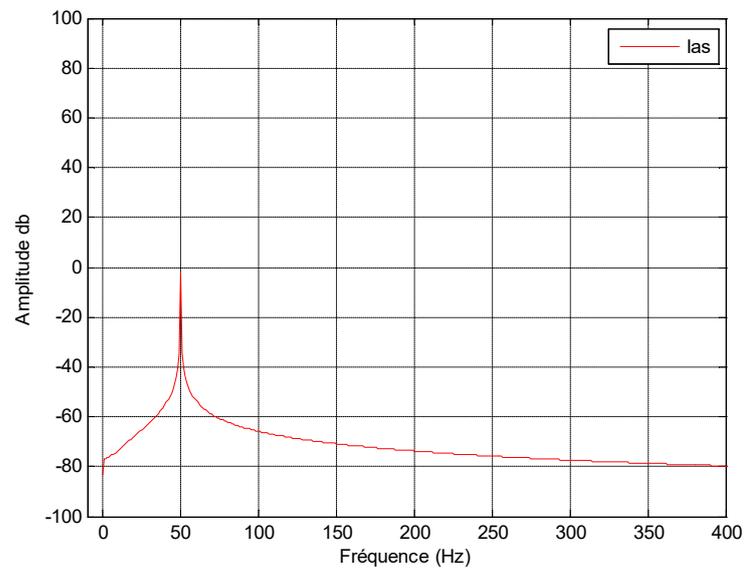


Figure 4.1: l'analyse spectrale du courant statorique phase (a) sain.

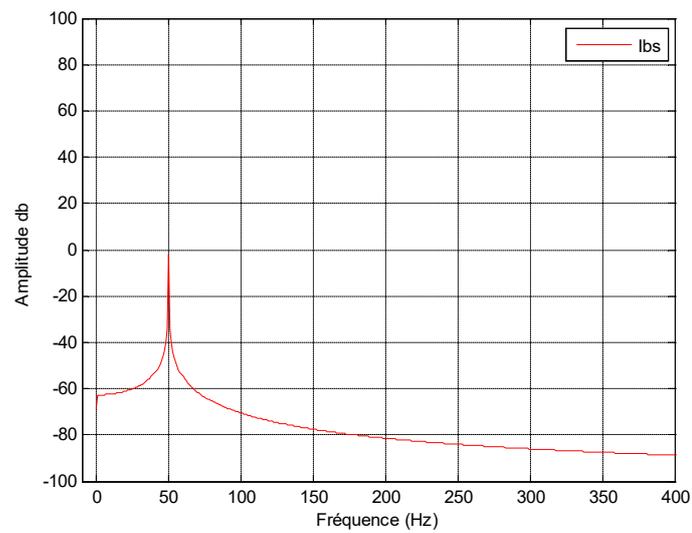


Figure 4.2: l'analyse spectrale du courant statorique phase (b) sain.

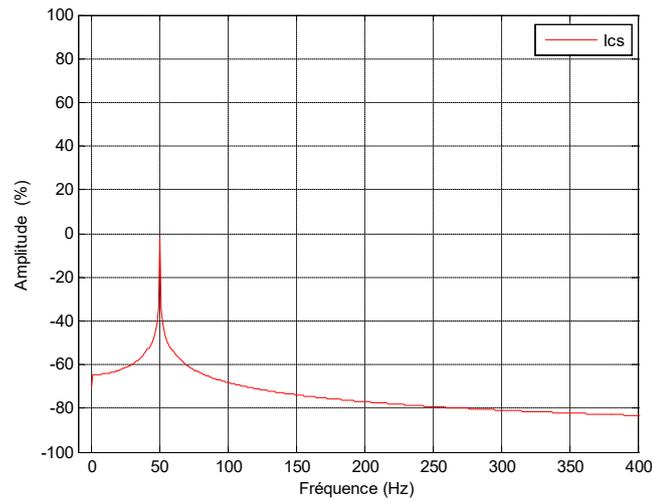


Figure 4.3: l'analyse spectrale du courant statorique phase (c) sain.

On observe une grande augmentation de [-80 dB] jusqu'à [-40dB] sur la raie (50)Hz.

On observe que l'amplitude de la raie [50], est le même pour les phases (a) (b) et (c).

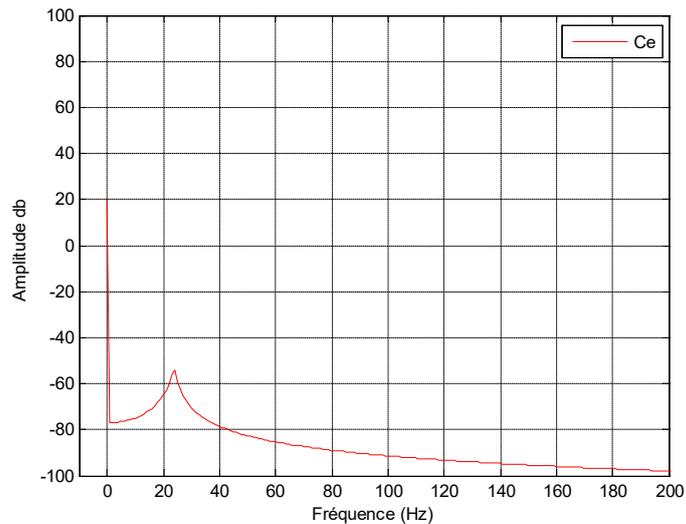


Figure 4.4. l'analyse spectrale de couple électromagnétique.

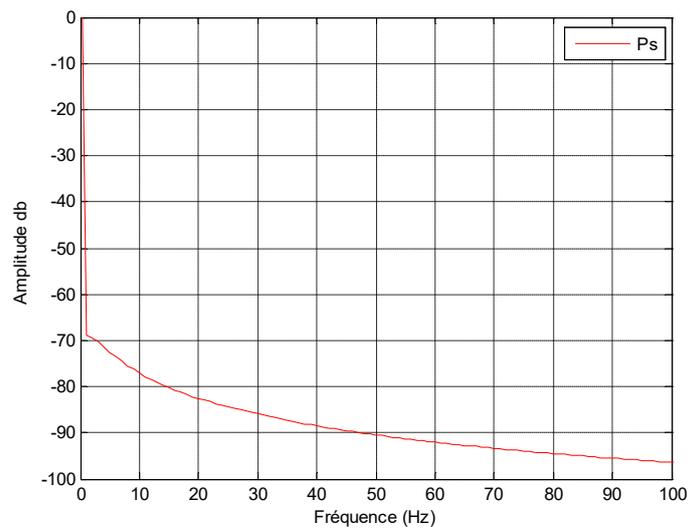


Figure 4.5. l'analyse spectrale de puissance.

- **Etat défaillant**

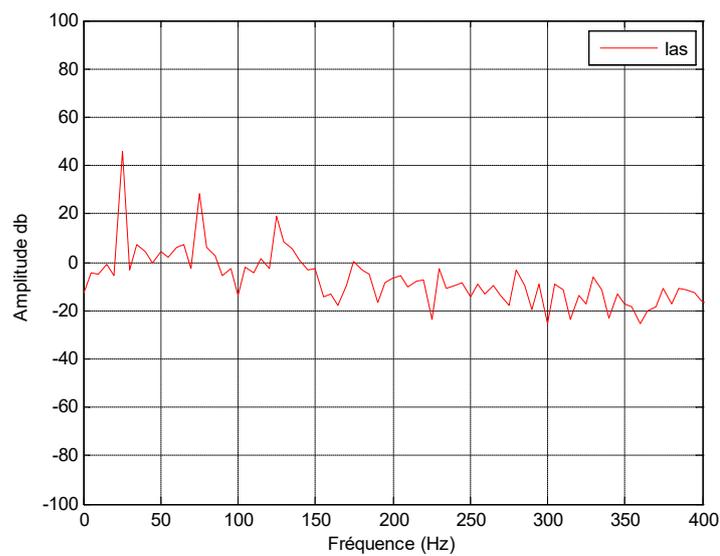


Figure 4.6 : l'analyse spectrale du courant statorique phase (a) défaut (a).

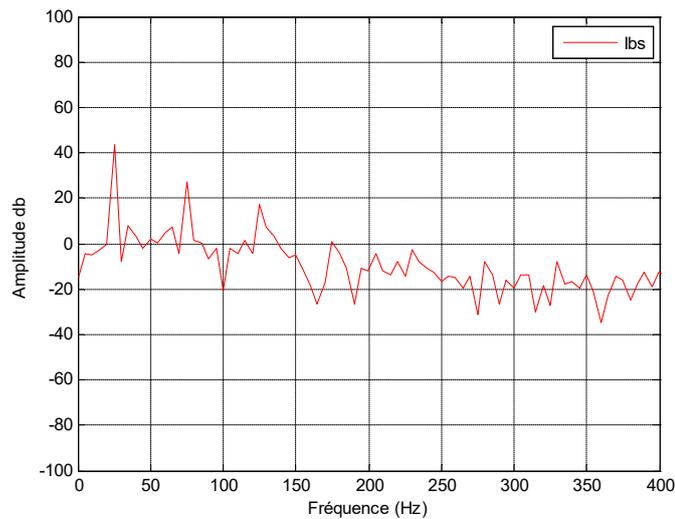


Figure 4.7 : l'analyse spectrale du courant statorique phase (b) défaut (a).

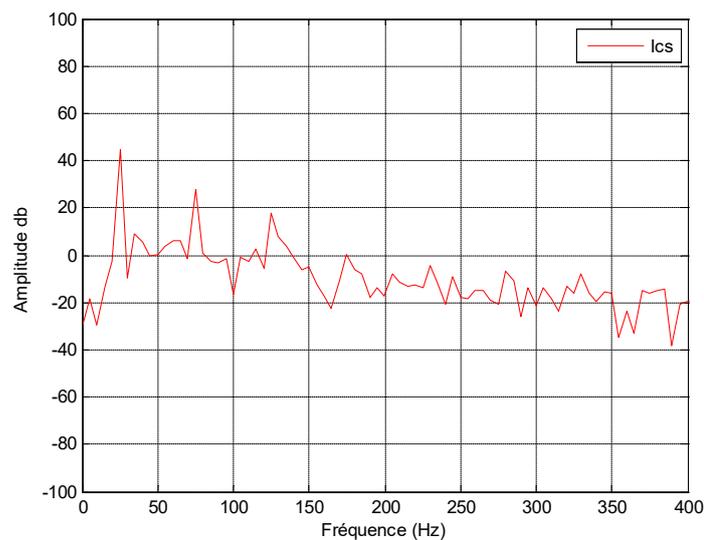


Figure 4.8 : l'analyse spectrale du courant statorique phase (c) défaut (a).

Le défaut laisse une signature sur le spectre du courant statorique qui se traduit par l'apparition des raies latérales autour de la fréquence fondamentale.

On observe une grande augmentation de $[-22 \text{ dB}]$ jusqu'à $[-10 \text{ dB}]$ sur la raie (35)Hz et des petites augmentation et des petites diminution sur les raies autour du fondamentale .

On observe que l'amplitude de la raie [35], est le même pour les phase (a) (b) et (c) mais la différence sur les petites raies.

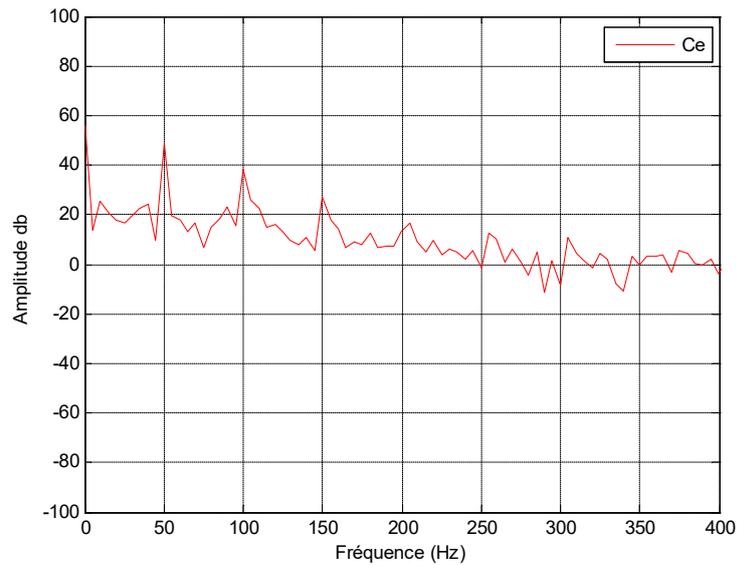


Figure 4.9. l'analyse spectrale de couple électromagnétique.

4.5. Conclusion

On a présenté dans ce chapitre les résultats de simulation d'une machine asynchrone à double alimentation pour différents régimes de fonctionnement sain et défaillants.

On a utilisé la transformée de Fourier pour l'analyse spectrale qui permet de détecter le défaut.

La transformée de Fourier est une des méthodes (la plus utilisée aujourd'hui) pour représenter un phénomène temporel dans le domaine fréquentiel. Cette représentation fréquentielle est une image parmi d'autres possibles du phénomène étudié.

La technique de l'analyse spectrale du courant statorique est la plus utilisée parce qu'elle permet non seulement la détection d'autres types de défauts mais aussi de s'affranchir des problèmes d'accessibilité.

Bibliographie

- [1] Babak VASEGHI, « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MACHINES ELECTRIQUES EN PRESENCE DE DEFAUT ENTRE-SPIRES Modélisation – Réduction du courant de défaut », Thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, le 3 décembre 2009.
- [2] MELLOUL Ahmed, « Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne », mémoire de magistère, la faculté de Technologie Département d'Electrotechnique, 2011.
- [3] YOUNES HADJIYASSER GADI « Détection de défauts dans le convertisseur à MLI d'une machine asynchrone », mémoire de master en Génie Electrique, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2013/2014.
- [4] MAZOUZ FARIDA « Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents », magister électronique, mémoire de master, l'Université Hadj La khdar Batna, 2013.
- [5] BENCHERIF Bilel « Etude et modélisation des différents composants d'une installation éolienne utilisant un générateur synchrone à aimants permanents », mémoire de master en électrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF, 2011.
- [6] DIAF YOUSOUF BEN ANTER DJAMAL « modélisation et commande d'un onduleur triphasé piloté par MLI à structure multi niveaux », mémoire de master en Génie électrique, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2011/2012.
- [7] SALMA EL AIMANI « modélisation des différents technologies d'éolienne intégrées dans un réseaux de moyen tension », thèse de doctorat , Ecole de Lille , 2004.
- [8] Mme HMECHA SAMIRA, Ep. BOUREKACHE « étude et commande d'une éolienne à base d'une machine a aimant permanents », mémoire de magister en electrotechenique, Université Mouloud Mammeri Tizi ouzou, 2013.
- [9] MOUSSA SIDDO Abdoulaziz et SOUMANA NOUHOU Ibrahim « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie ,2007.
- [10] Chambre de Commerce et d'Industrie de la Meuse ; l'énergie éolienne 2012.
- [11] Naouel HAMDY « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.
- [12] REDJEM Radia « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » mémoire de magistère en Electrotechnique, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2009

Bibliographie

- [13] Youcef Soufi « Modélisation et diagnostic d'une, association convertisseur machine électrique », thèse de doctorat en automatique, Université Badji Mokhtar ANNABA, 2012.
- [14] Machine asynchrone « technologie, choix et alimentation des machines asynchrones » Philippe LE BRUN, Lycée Louis ARMAND ,173 Bd de Strasbourg , 94736 NOGENT sur Marne.
- [15] HAKIM BENNANI « MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION Les lois de commande en régime permanent » mémoire de master, UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2011.
- [16] Bruno FRANCOIS, « La génératrice asynchrone à double alimentation (Modélisation et commande) », mémoire de master en énergie électrique, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance : L2EP.
- [17] BELHAMDI Saad « Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande » thèse de doctorat en électrotechnique, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [18] <https://www.youtube.com/watch?v=KWKQ9P6xYpw>.
- [19] <https://www.youtube.com/watch?v=R37Lv2-JDIw>.
- [20] <https://www.youtube.com/watch?v=v6ZNDQ80ELEw>.
- [21] Livre de « modélisation et commande de la machine asynchrone », professeur, directeur scientifique de l'école centrale de Lille.
- [22] Hakim Cherif « détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelette », mémoire de magister en génie électrique, université Mohammed Khider-Biskra, 2014.
- [23] Atoui Issam « contribution au diagnostic de défaut dans une chaîne de production d'énergie », mémoire de magister en électrotechnique, université Badji Moukhtar Annaba, 2009.
- [24] Medoued Ammar « surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques », thèse de doctorat en électrotechnique, université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.
- [25] Latreche Mohammed Tahar « commande floue de la machine synchrone à aimant permanent utilisé dans un système éolienne », mémoire de magister en électrotechnique, université Ferhat Abbas de Setif, 2012.

Bibliographie

[26] F. Kendouli, K.Nabti, K.Abed et H.Benalla « modélisation simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basé sur la génératrice asynchrone double alimentation » , laboratoire électrotechnique de Constantine, université Mentouri Constantine, 2011.

[27] Rouabhi Riyadh « étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation, application : énergie éolienne », mémoire de magister en électrotechnique, université Ferhat Abbas, 2012.

Conclusion générale

Nous avons entamé un sujet qui est en plein développement, «la production d'électricité par un aérogénérateur a base d'une machine asynchrone double alimentation MADA ».

Dans le premier chapitre nous avons fait un aperçu sur l'état de l'art de l'énergie éolienne dont nous sommes intéressés par une étude simple sur le principe de fonctionnement d'une turbine éolienne et sa composition.

Le deuxième chapitre présente la constitution de la MADA leur principe de fonctionnement avec une modélisation saine et en cas de défaut

Les résultats de la simulation du modèle de la machine montrent un bon fonctionnement de la MADA saine alors qu'on remarque la dégradation des performances de la MADA en présence d'un défaut

Le troisième chapitre présente la modélisation de la partie essentielle de la chaîne de conversion éolienne « la turbine » avec une modélisation globale des différentes composantes telle que l'onduleur et le redresseur MLI.

L'étude de l'analyse spectrale du courant statorique pour détecter le défaut de court-circuit entre spires est le contenu du quatrième chapitre, nous avons analysé aussi les défauts pour une phase et plusieurs phases.

L'analyse des résultats obtenus, montre que l'utilisation de la FFT est efficace pour la détection des défauts statoriques.