

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 البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Machines Electriques

présenté par :

BOUTI Oussama

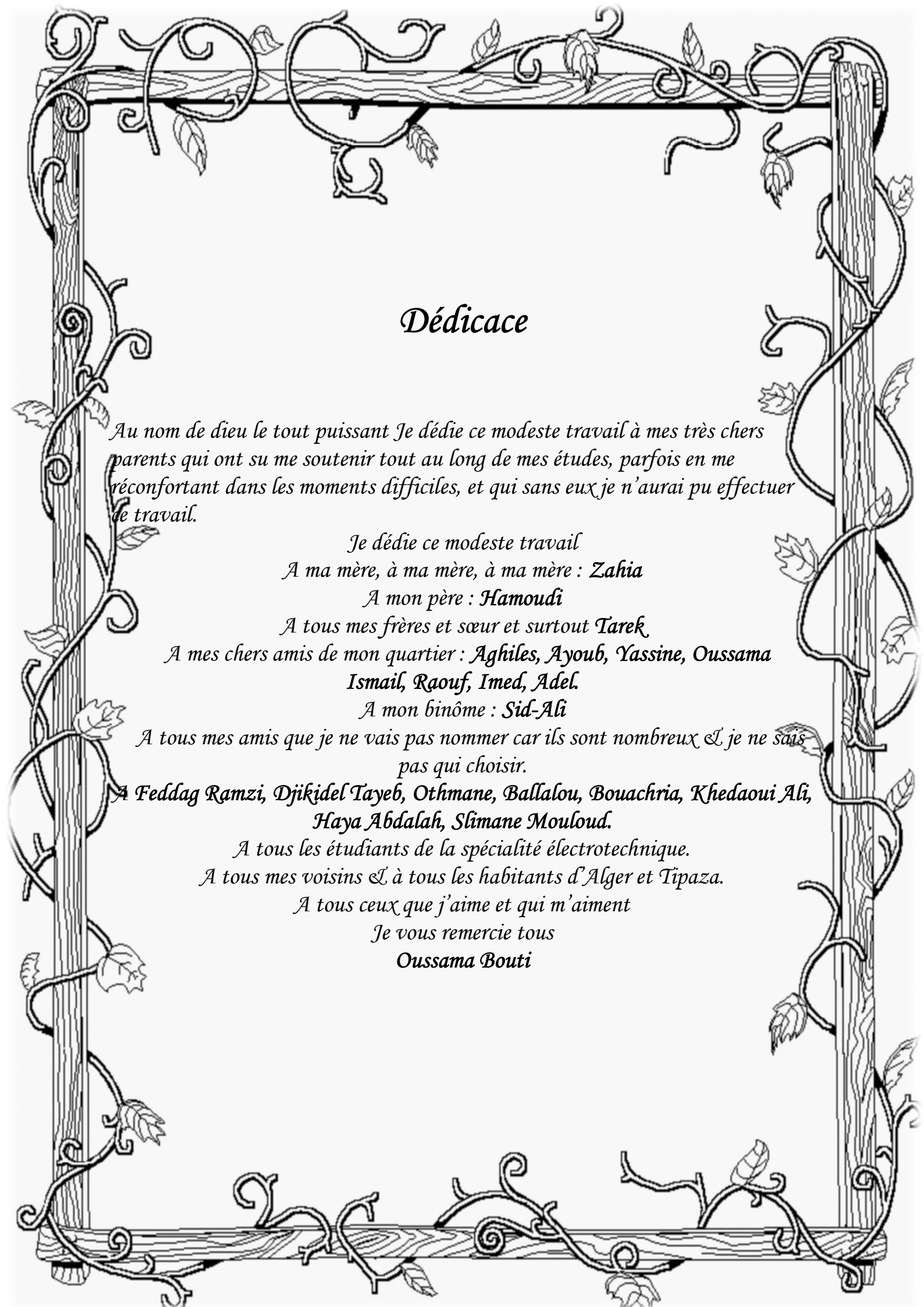
&

EL BAA Sid-Ali

Modélisation et Diagnostic des Défauts Statoriques et Rotoriques d'une MADA appliquée dans une Chaîne Eolienne

Proposé par : **KOUCHIH Djilali**

Année Universitaire 2016-2017



Dédicace

Au nom de dieu le tout puissant Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui ont su me soutenir tout au long de mes études, parfois en me réconfortant dans les moments difficiles, et qui sans eux je n'aurai pu effectuer de travail.

Je dédie ce modeste travail

A ma mère, à ma mère, à ma mère : Zahia

A mon père : Hamoudi

A tous mes frères et sœur et surtout Tarek.

*A mes chers amis de mon quartier : Aghiles, Ayoub, Yassine, Oussama
Ismail, Raouf, Imed, Adel.*

A mon binôme : Sid-Ali

A tous mes amis que je ne vais pas nommer car ils sont nombreux & je ne sais pas qui choisir.

*A Feddag Ramzi, Djikidel Tayeb, Othmane, Ballalou, Bouachria, Khedaoui Ali,
Haya Abdalah, Slimane Mouloud.*

A tous les étudiants de la spécialité électrotechnique.

A tous mes voisins & à tous les habitants d'Alger et Tipaza.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Je vous remercie tous

Oussama Bouti

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à
Mes chers parents, pour leur soutien moral et d'être la lumière de ma vie,
qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études dans de bonnes conditions,
en leur espérant une longue vie et que الله les gardes.*

➤ *Je dédie ce modeste travail à :*

✚ *A ma mère, à ma mère, à ma mère : Fatiha*

✚ *Mon père : Djilali*

✚ *A ma chère sœur : Imane*

✚ *A mon frère : Abdelkader*

✚ *A mon nièce : maria*

✚ *A toute ma famille*

➤ *A tous mes amis surtout :*

✚ *Boutaleb azzedine et Himri tayeb*

✚ *A mes chers amis de mon quartier.*

✚ *A mes chers amis de l'université.*

✚ *A mon binôme Bouti Oussama*

A toute la promotion 2016-2017 machine électrique sans exception.

A toute la promotion 2014-2015 électrotechnique sans exception.

A tous ceux que j'aime

EL-Baa Sid-ali

Remerciements

Nos remerciements vont premièrement à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé, et la patience, qu'il nous a données durant toutes ces années d'étude.

Nos remerciements tout d'abord à Dr Dj. Kouchih, Maître de Conférences à l'Université de Blida, d'avoir proposé ce sujet de mémoire. Nous souhaitons lui témoigner notre profonde reconnaissance, toute notre gratitude et notre respect pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail, pour les discussions enrichissantes et instructives qui ont été très motivantes et la confiance qu'il nous a constamment témoignée.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre co-promoteur Mr N. Boumalha, pour l'aide et les précieux conseils dont nous avons bénéficiés tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nos sincères remerciements à messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électronique, et notamment durant les 3 dernières années d'étude, particulièrement à M. Belaazoug, M. Cherfa, M. Akhrif, M. Ferdjouni, M. Aidja et Mme Elmeraoui, Mme Chentir qui ont été pour nous très précieux par leurs conseils judicieux et informations pertinentes.

Nous adressons des remerciements très sincères pour tous nos collègues de classe. Enfin, nous n'oublierons jamais toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Le travail présenté porte sur la modélisation, le contrôle et le diagnostic d'un système de conversion électromécanique d'énergie électrique à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) intégré dans le système éolien, pour un fonctionnement sain et avec défaut de court circuit statorique et rotorique. La **MADA** est connecté directement au réseau et pilotée par son rotor via un onduleur à MLI. En premier lieu, nous avons commencé par une synthèse bibliographique sur le système éolien et le diagnostic des défauts de la machine asynchrone à double alimentation. Nous avons effectué également une étude de modélisation de la turbine éolienne et de la génératrice asynchrone à double alimentation. Une commande vectorielle est mise en œuvre avec orientation de flux statorique pour le contrôle de puissance réactive statorique et la puissance active développée par les enroulements statoriques. L'étude par simulation de l'effet du défaut de court-circuit statorique et rotorique sur la commande de la MADA est effectuée. Enfin, La détection de ce type de défaut est faite par l'utilisation de la technique de l'analyse spectrale du courant statorique et rotorique. Les résultats obtenus ont été très indicatifs des défauts de court-circuit statorique et rotorique, en les comparants avec ceux existants dans la littérature.

Mots clés : Eolienne – MADA –MLI- commande vectorielle - court circuit – diagnostic.

Abstract

The work presented concerns the modeling, control and diagnosis of an electromechanical energy conversion system based on a dual-power asynchronous generator (MADA) integrated into the wind system, for a healthy and fault-free operation Of short stator and rotor circuit. The MADA is connected directly to the network and driven by its rotor via a MLI inverter. First, we began with a bibliographic synthesis on the wind system and the fault diagnosis of the double feed asynchronous machine. We also carried out a modeling study of the wind turbine and the double feed asynchronous generator. A vector control is implemented with stator flux orientation for the stator reactive power control and the active power developed by the stator windings. The simulation study of the effect of the stator and rotor short-circuit fault on the control of the MADA is carried out. Finally, the detection of this type of defect is made by the use of the spectral analysis technique of the stator and rotor current. The results obtained have been very indicative of stator and rotor short-circuit defects, comparing them with those existing in the literature.

Key words: Wind turbine - modeling - double fed induction generator - vector control - short circuit.

ملخص

يتعلق هذا العمل إلى النمذجة والرصد والتشخيص نظام الكهروميكانيكية لتحويل الطاقة الكهربائية على أساس مولد متزامن تغذية مضاعفة (MADA) والمتكاملة مع نظام طاقة الرياح لعملية صحية، والفشل الدائرة الموالي قصيرة. تتصل MADA مباشرة إلى شبكة ويقودها الدوار لها عبر العاكس MLI. أولاً، بدأنا مع مراجعة الأدب على نظام الرياح وتشخيص الأخطاء من غير المتزامن تغذية مضاعف. لقد أجرينا أيضاً دراسة نماذج من توربينات الرياح وتحريض مولد الطاقة المزدوجة. ويتم تنفيذ مكافحة ناقلات مع التوجه الموالي تدفق لسيطرة الموالي قوة رد الفعل، والطاقة النشطة الناتجة عن اللفات الموالي. يتم تنفيذ دراسة محاكاة تأثير فشل الموالي ماس كهربائي على السيطرة على MADA. وأخيراً، يتم الكشف عن هذا النوع من الخلل باستخدام تقنية التحليل الطيفي الموالي الحالية. وكانت النتائج إرشادية للغاية من العيوب الموالي ماس كهربائي، من خلال مقارنتها مع تلك الموجودة في الأدب.

كلمات البحث: الرياح - مكافحة ناقلات MLI - MADA - ماس كهربائي - التشخيص

Chapitre 1

Figure 1.1. Carte de potentiel éolien en Algérie.....	(8)
Figure 1.2. Principe de conversion d'énergie.....	(9)
Figure 1.3. Type de montage de la voilure.....	(10)
Figure 1.4. Les éoliennes à axe horizontal.....	(11)
Figure 1.5. Principaux composants d'une éolienne.....	(12)
Figure 1.6. Montage d'un mât tubulaire.....	(13)
Figure 1.7. Tour en treillis métalliques.....	(13)
Figure 1.8. La Nacelle.....	(13)
Figure 1.9. Les Pales.....	(14)
Figure 1.10. Le rotor.....	(14)
Figure 1.11. Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes.....	(15)
Figure 1.12. Le multiplicateur.....	(16)
Figure 1.13. L'arbre de transmission.....	(16)
Figure 1.14. Girouette.	(17)
Figure 1.15. Anémomètre.....	(17)
Figure 1.16. Système d'orientation de la nacelle.	(17)
Figure 1.17. Système de contrôle (commande).....	(18)
Figure 1.18. La fondation en béton.	(18)
Figure 1.19. Tube de courant à travers une éolienne.	(19)
Figure 1.20. Courbe caractéristique du coefficient de puissance.....	(20)
Figure 1.21. Coefficient de puissance pour différents types d'éolienne.....	(21)
Figure 1.22. Courbe de puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	(22)
Figure 1.23. Orientation de la nacelle en vue de la limitation de la puissance.....	(23)
Figure 1.24. Eolienne à vitesse fixe.	(25)
Figure 1.25. Eoliennes fonctionnant à vitesse variable.....	(26)
Figure 1.26. Machine synchrone entraînée par une turbine éolienne et reliée au réseau par un dispositif redresseur MLI- onduleur MLI.	(27)
Figure 1.27. Représentation des différents défauts statoriques possibles.....	(30)
Figure 1.28. Représentation de l'excentricité statique et dynamique.....	(32)

Chapitre 2

Figure 2.1. Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.....	(38)
Figure 2.2. Passage du triphasé au biphasé La matrice de transformation.....	(42)
Figure 2.3. Couple électromagnétique	(45)

Figure 2.4. Vitesse de rotation.....	(45)
Figure 2.5 . Courant rotorique réelle.....	(45)
Figure 2.6. Courant rotorique de Park.....	(45)
Figure 2.7. Flux statorique réelle.....	(46)
Figure 2.8. Flux statorique de Park.....	(46)
Figure 2.9. Schéma de principe d'un redresseur MLI.....	(48)
Figure 2.10. Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI..	(50)
Figure 2.11. Redresseur MLI triphasé et sa commande ..	(51)
Figure 2.12. Principe du Contrôle par hystérésis. ..	(52)
Figure 2.13. Modulateur MLI à bande d'hystérésis. ..	(52)
Figure 2.14. L'onduleur de tension associé à La machine. ..	(53)
Figure 2.15. Principe de la commande MLI- intersective. ..	(56)
Figure 2.16. La tension du bus continu..	(57)
Figure 2.17. Vitesse de rotation de la MADA alimentée par la cascade	(57)
Figure 2.18. Vitesse de rotation de la MADA alimentée par réseau	(57)
Figure 2.19. couple électromagnétique de la MADA alimentée par la cascade	(58)
Figure 2.20. Couple électromagnétique de la MADA alimentée par le réseau	(58)
Figure 2.21 . Les Courants rotoriques de la MADA alimentée par le réseau	(58)
Figure 2.22 . Les Courants rotoriques de la MADA alimentée par la cascade	(58)
Figure 2.23 . Les Courants rotoriques MADA alimentée par la cascade (Zoom)	(59)
Figure 2.24 . Les Courants rotoriques MADA alimentée par le réseau (Zoom)	(59)

Chapitre 3

Figure 3.1. Vitesse du vent V_v et la vitesse tangentielle (Ω_{trb}, R). ..	(64)
Figure 3.2. Caractéristique de la turbine éolienne. ..	(64).
Figure 3.3. Modèle mécanique de la turbine éolienne. . .	(65)
Figure 3.4. Le schéma bloc du modèle de la turbine. . .	(67)
Figure 3.5. Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.....	(68)
Figure 3.6. Caractéristique de l'éolienne dans le plan, vitesse de rotation.....	(69)
Figure 3.7. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la	vitesse(71)
Figure 3.8. Schéma bloc de l'asservissement en utilisant un régulateur PI.	(71)
Figure 3.9. Orientation du flux statorique.....	(74)

Figure 3.10. Schéma bloc de la MADA.	(77)
Figure 3.11. Schéma bloc de la commande directe.....	(79)
Figure 3.12. Système régulé par un PI.....	(80)
Figure 3.13. Schéma structurel du système éolien global.....	(81)
Figure 3.14. Le profil du vent.....	(82)
Figure 3.15. La vitesse de rotation.....	(82)
Figure 3.16. La puissance aérodynamique	(82)
Figure 3.17. Le facteur de puissance.....	(82)
Figure 3.18. La puissance active statorique	(83)
Figure 3.19. La puissance réactive statorique.....	(83)
Figure 3.20. Courants statorique.....	(83)
Figure 3.21. courants rotorique.....	(83)
Figure 3.22. Couple électromagnétique	(84)
Figure 3.23. tensions statorique.....	(84)

Chapitre 4

Figure 4.1. Représentation des trois enroulements statoriques d'une MADA avec court-circuit entre spires dans la phase 'a'.....	(88)
Figure 4.2. Les courants statoriques de la MADA avec défaut statorique dans la phase (a).	(93)
Figure 4.3. Zoom des courants statoriques de la MADA avec défaut statorique dans la phase(a) ...	(94)
Figure 4.4. vitesse de la MADA avec défaut statorique dans la phase (a).	(94)
Figure 4.5. Couple de la MADA avec défaut statorique dans la phase (a)	(95)
Figure 4.6. Puissance statorique de la MADA avec défaut statorique dans la phase (a)	(95)
Figure 4.7. Les courants rotorique de la MADA avec défaut rotorique dans la phase (a).	(97)
Figure 4.8. Zoom des courants rotorique de la MADA avec défaut rotorique dans la phase(a).	(97)
Figure 4.9. vitesse de la MADA avec défaut rotorique dans la phase (a).	(97)
Figure 4.10. Couple de la MADA avec défaut rotorique dans la phase (a).	(98)
Figure 4.11. Puissance rotorique de la MADA avec défaut rotorique dans la phase (a).	(98)
Figure 4.12. Le FFT de courant statorique sans défaut	(99)
Figure 4.13. Le FFT de courant statorique avec défaut	(99)
Figure 4.14. Le FFT de couple sans défaut	(100)
Figure 4.15. Le FFT de couple électromagnétique avec défaut	(100)
Figure 4.16. Le FFT de la vitesse sans défaut	(100)
Figure 4.17. Le FFT de la vitesse avec défaut.....	(100)
Figure 4.18. Le FFT de courant rotorique sans défaut	(101)

Figure 4.19. Le FFT de courant rotorique avec défaut.....	(101)
Figure 4.20. Le FFT de couple électromagnétique sans défaut	(102)
Figure 4.21. Le FFT de couple électromagnétique avec défaut.....	(102)
Figure 4.22. Le FFT de la vitesse sans défaut.....	(102)
Figure 4.23. Le FFT de la vitesse avec défaut	(102)

Symbole	Signification
m :	Masse d'air en mouvement.
V_1 :	Vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.
V_2 :	Vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.
ρ :	Densité de l'air à température à 15°.
S :	Surface des pales.
$P_{méc}$:	Puissance mécanique extraite du vent.
P_{th} :	Puissance théorique.
C_p :	Coefficient de puissance de l'éolienne.
λ :	Ratio de vitesse.
v_v^{min}	Vitesse du vent à laquelle peut démarrer l'éolienne.
$f.e.m$:	Force électromagnétique.
$f.m.m$:	Force magnétomotrice.
E_r :	Force électromagnétique créée au rotor.
E_s :	Force électromagnétique créée au stator.
N_s :	Nombre de spires des bobinages statorique.
N_r :	Nombre de spires des bobinages rotorique.
r :	Le rapport de transformation rotor/stator équivalent au rapport des nombres de spires rotorique et statorique.
p :	Nombre de paires de pôles.
g :	Glissement.
S_r :	Puissance apparente rotorique.
S_s :	Puissance apparente statorique.
s, r :	Indice du stator, du rotor.
d, q :	Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature.
θ_s :	Angle électrique statorique.
θ_r :	Angle électrique rotorique.
θ :	L'angle entre l'enroulement statorique et l'enroulement rotorique.
ω_s :	Pulsation statorique de la MADA.
ω_e :	Pulsation électrique de la MADA.
w :	Pulsation mécanique.
$V_{s,abc}$:	Tension des phases statoriques.
$V_{r,abc}$:	Tension des phases rotoriques.
$V_{s,dq}$:	Tension statorique sur les axes d et q.
$V_{r,dq}$:	Tension rotorique sur les axes d et q.
$I_{s,abc}$:	Courant des phases statoriques.
$I_{r,abc}$:	Courant des phases rotoriques.
$i_{s,dq}$:	Courant statorique sur les axes d et q.
$i_{r,dq}$:	Courant rotorique sur les axes d et q.

$\Phi_{s,abc}$:	Flux des phases rotoriques.
$\Phi_{r,abc}$:	Flux des phases rotoriques.
$\Phi_{s,dq}$:	Flux statorique sur les axes d et q.
$\Phi_{r,dq}$:	Flux rotorique sur les axes d et q.
R_s :	Résistance d'enroulement statorique.
R_r :	Résistance d'enroulement rotorique.
l_s :	Inductance de fuite de statorique.
l_r :	Inductance de fuite de rotorique.
L_s :	Inductance cyclique statorique.
L_r :	Inductance cyclique rotorique.
M_{sr} :	Inductance mutuelle stator-rotor.
M_s :	Inductance mutuelle entre les enroulements du stator.
M_r :	Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor.
M :	Mutuelle cyclique entre rotor-stator.
σ_r :	Coefficient de blondel.
C_r :	Couple résistant.
C_f :	Couple de frottements visqueux de la MADA.
N_c :	Nombre total de spires court-circuitées.
N_s :	Nombre de spires totales par phase.
$cc\%$:	Le pourcentage des spires court-circuitées (le degré de défaut).
MLI :	Modélisation à large impulsion.
STPWM :	Sinus-triangle Pulse With Modulation.
$S_{a,b,c}$:	Les états logique des interrupteurs : a, b et c.
V_p :	La valeur d'amplitude de la porteuse.
m :	L'indice de modulation.
f_p :	Fréquence de la porteuse.
f_r :	Fréquence de la référence.
r :	Le coefficient de réglage.
C :	La capacité de bus continu.
ε_k :	Erreur de courant de la commande hystérisé.
Di :	Bande ou fourchette d'hystérésis.
i_{ref} :	Le courant de référence du redresseur.
i_{mes} :	Le courant mesuré du redresseur.
U_{dc} :	Tension redressée.
U_{dc-ref} :	Tension redressée de référence.
i_{dc} :	Courant de bus continu.
i_{ch} :	Courant de charge.
$i_{a,b,c}$:	Les courants d'entrée du redresseur.
$v_{a,b,c}$:	Les tensions d'entrée du redresseur.
v_{ab} :	Tension entre les lignes a, b.

v_{bc} :	Tension entre les lignes b, c.
v_{ca} :	Tension entre les lignes c, a.
V_v :	Vitesse de vent (m/s).
A :	Valeur moyenne de la vitesse du vent.
a_k :	Amplitude de l'harmonique de l'ordre k.
w_k :	Pulsation de l'harmonique de l'ordre k.
i :	Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.
P_v :	Puissance du vent.
P_{trb} :	Puissance de la turbine.
β :	Angle de calage.
C_{trb} :	Couple turbine.
J_{trb} :	Moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales.
J_g :	Moment d'inertie de la MADA.
f_{vis} :	Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA.
C_g :	Couple généré sur l'arbre qui entraîne la génératrice (MADA).
Ω_{mec} :	Vitesse de rotation de la MADA.
G :	Représente le gain du multiplicateur.
C_{vis} :	Couple des frottements visqueux.
MPPT :	Maximum Power Point Tracking.
C_p^{opt} :	Coefficient de puissance optimale.
C_{em} :	Couple électromagnétique de la machine (N.m).
C_{em_ref} :	Couple électromagnétique référence de la machine (N.m).
K_{ass} :	Régulateur de vitesse.
Ω_{mec_ref} :	La vitesse mécanique de référence.
Ω_{trb_ref} :	Vitesse de la turbine de référence.
Ω_{trb} :	Vitesse de la turbine.
λ_{opt} :	Valeur optimale de la vitesse spécifique.
R :	Rayon de la turbine.
ki :	Le gain intégral.
kp :	Le gain proportionnel.
ω_n :	Pulsation propre.
ξ_n :	Facteur d'amortissement.
P_s :	Puissance active statorique
Q_s :	Puissance réactive statorique

Paramètres de la MADA :

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

$R_s = 1.2 \Omega$	<i>Résistance du stator</i>
$R_r = 1.8 \Omega$	<i>Résistance du rotor</i>
$L_s = 0.1554 H$	<i>Inductance d du stator</i>
$L_r = 0.1568 H$	<i>Inductance de rotor</i>
$M = 0.15 H$	<i>Inductance mutuelle</i>
$J = 0.2 kg.m^2$	<i>Inertie du rotor</i>
$f_r = 0.001 N.m.s/rad$	<i>Coefficient de frottement</i>
$f_s = 50 Hz$	<i>Fréquence statorique</i>
$f_r = 15 Hz$	<i>Fréquence rotorique</i>
$f_p = 0.89$	<i>Facteur de puissance</i>
$P = 2$	<i>Nombre de paires de pôles</i>

Paramètres de l'onduleur :

$E = 600$	<i>Tension d'entrée</i>
$r = 0.7$	<i>Coefficient de réglage</i>
$m = 21$	<i>Indice de modulation</i>

Paramètres de redresseur :

$R_l = 0.3$	<i>La résistance de la ligne</i>
$L_l = 0.001$	<i>L'inductance de la ligne</i>
$C = 2$	<i>Capacité de filtrage</i>
$R = 62$	<i>La charge</i>
$Di = 0.1$	<i>Bonde hystérésis</i>
$\varphi_i = 0.304$	<i>Déphasage entre courant et tension</i>
$uc_{ref} = 722$	<i>Tension de référence de bus continu</i>

Paramètres de la turbine:

$n_{pal} = 3$	<i>Nombre des pales</i>
$R = 35.25$	<i>Rayon d'une pale</i>
$\rho = 1.22$	<i>La masse volumique</i>
$G = 90$	<i>Gain du multiplicateur</i>
$J_g = 50$	<i>L'inertie de la génératrice</i>

$Jt = 50$

L'inertie du turbine

Introduction générale	(1)
------------------------------------	------------

Chapitre 1 :

Généralité sur les systèmes éoliens et diagnostic des défauts de la machine asynchrone

1.1. Introduction.....	(5)
1.2. Historique de l'éolien.....	(5)
1.3. Définition De l'énergie éolienne.....	(6)
1.4. Contexte Actuel.....	(7)
1.5. Principe de fonctionnement.....	(8)
1.6. Classification des éoliennes.....	(9)
1.6.1. Par rapport à leurs axes.....	(9)
a. Eoliennes à axe vertical.....	(9)
a.1. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical.....	(10)
b. Eoliennes à axe horizontal.....	(10)
b.1 Eoliennes rapides.....	(11)
b.2. Eoliennes lentes.....	(11)
b.3. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal.....	(11)
1.7. Principaux composants d'une éolienne.....	(12)
1.7.1. La tour (mat).....	(12)
1.7.2. La nacelle.....	(13)
1.7.3. Les pales.....	(13)
1.7.4. Le rotor.....	(14)
a. Les rotors à vitesse fixe.....	(14)
b. Les rotors à vitesse variable.....	(14)
c. Intérêts de la vitesse variable.....	(14)
1.7.5. Frein.....	(15)
1.7.6. La génératrice.....	(15)

1.7.7. Le multiplicateur.....	(15)
1.7.8. L'arbre de transmission.....	(16)
1.7.9. Le système de refroidissement.....	(16)
1.7.10. Les outils de mesure du vent.....	(16)
a. Anémomètre.....	(16)
1.7.11. Système d'orientation de la nacelle.....	(17)
1.7.12. Système de contrôle (commande).....	(17)
1.7.13. La fondation en béton.....	(18)
1.8. Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.....	(18)
1.8.1. Loi fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	(19)
a. Loi de Betz.....	(19)
b. Production d'énergie mécanique.....	(21)
1.8.2. Contraintes mécaniques associées à la conversion de l'énergie éolienne	(23)
1.9. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne.....	(24)
1.9.1. Les systèmes à vitesse fixe.....	(24)
1.9.2. Les systèmes à vitesse variable.....	(25)
1.10. Différents Systems utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne...	(26)
1.10.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	(26)
1.10.2. Systèmes utilisant la machine synchrone.....	(27)
1.11. État de l'art du diagnostic de la machine asynchrone.....	(28)
1.11.1. Cause des défauts	(29)
1.11.2. Présentation des défauts.....	(29)
a. Défauts affectant le stator.....	(30)
b. Défauts affectant le rotor.....	(30)

b.1. Rotor à cage d'écureuil	(30)
b.1.1. Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique.....	(31)
b.1.2. Défaut de roulements.....	(31)
b.1.3. Défauts d'excentricités.....	(31)
b.2. Rotor bobiné	(32)
b.2.1. Défaut de courts-circuits.....	(32)
b.2.2. Défaut de contact balai – bague.....	(32)
1.12. Conclusion.....	(33)

Chapitre 2

Modélisation de MADA associée aux Convertisseurs

2.1. Introduction.....	(35)
Première partie: Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	(36)
2.2. Fonctionnement et modélisation de la MADA.....	(36)
2.2.1. Fonctionnement de la MADA.....	(36)
2.2.2. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation « sain »...	(37)
a. Modèle de la MADA dans le plan « ABC »	(37)
a.1 Equations électriques de la machine.....	(38)
a.2. Equations mécaniques de la machine.....	(40)
a.3. MISE SOUS FORME D'EQUATIONS D'ETAT.....	(40)
b. Modèle de la MADA dans le repère d-q.....	(41)
b.1. La transformation de Park.....	(41)
b.2. Choix de la référence	(42)
b.2.1. Référentiel lié au stator.....	(42)
b.2.2. Référentiel lié au rotor.....	(43)
b.2.3. Référentiel lié au champ tournant.....	(43)
b.3. MISE SOUS FORME D'EQUATIONS D'ETAT.....	(43)

2.4. Résultat de simulation.....	(44)
2.4.1.Simulation pour un fonctionnement sain de la MADA.....	(44)
Deuxième partie : Modélisation de la cascade redresseur-onduleur-MADA.....	(47)
2.5. Modélisation de redresseur MLI à bonde hystérésis.	(47)
2.5.1. Structure générale du redresseur MLI.....	(47)
2.5.2. Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI.	(47)
2.5.3. Modèle de redresseur MLI.....	(48)
2.5.4. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé.....	(49)
2.5.5. Le récepteur (la charge)	(49)
2.5.6. Commande de redresseur MLI par hystérésis en courant.....	(51)
a. Principe de commande par hystérésis en courant.	(51)
2.6. Modélisation de l'onduleur de tension.....	(52)
2.6.1. Modèle mathématique de l'onduleur de tension.....	(53)
2.6.2. La technique de modulation «Sinus-triangle» (STPWM).....	(55)
2.7. Résultats de simulation	(56)
2.8. Conclusion	(60)

Chapitre 3

Asservissement du système éolien en régime sain

3.1. Introduction.....	(62)
3.2. Modélisation de la turbine éolienne.....	(62)
3.2.1. Modélisation du vent.....	(62)
3.2.2. Modèle aérodynamique.....	(63)
3.2.3. Le coefficient de vitesse réduite (tip-speed ratio)	(63)

3.2.4. Modèle de la partie mécanique.....	(65)
a. Modèle du multiplicateur de vitesse.....	(66)
b. Modèle de l'arbre.....	(66)
3.3. Stratégie de commande de la turbine éolienne.....	(67)
3.3.1. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne	(67)
3.3.2. Méthodes de recherche du point maximum de puissance.....	(69)
a. MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne.....	(70)
b. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse	(70)
c. Calcul des paramètres du régulateur de vitesse PI.....	(71)
3.4. Commande vectorielle par la puissance active et réactive.....	(72)
3.4.1. Principe de la commande vectorielle.....	(72)
a. Choix du référentiel pour le modèle déphasé	(73)
b. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	(78)
3.4.2. Commande directe.....	(78)
3.4.3. Mise en place de la régulation.....	(78)
a. Synthèse du régulateur PI.....	(79)
3.5. Résultats de simulation.....	(82)
3.6. Conclusion.....	(85)

Chapitre 4

Diagnostic de la MADA en court-circuit Statorique et Rotorique

4.1. Introduction.....	(87)
4.2. Modélisation de la MADA avec défaut statorique « court-circuit entre spires ».....	(87)

4.3. Modélisation de la MADA avec défaut rotorique «court-circuit entre spires».....	(90)
4.4. Modélisation de la MADA avec défaut statorique et rotorique «court-circuit entre spires».....	(91)
4.5. Résultats de simulation	(93)
4.5.1. Simulation pour un fonctionnement en court-circuit statorique de la MADA en modèle réel (abc).....	(93)
4.5.2. Simulation pour un fonctionnement en court-circuit rotorique de la MADA en modèle réel (abc).....	(96)
4.6. Résultat avec analyse spectral par FFT.....	(99)
4.6.1. Analyse spectrale de la MADA en court-circuit statorique.....	(99)
4.6.2. Analyse spectrale de la MADA en court-circuit rotorique.....	(101)
4.7. Conclusion	(103)
Conclusion générale.....	(105)

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

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

Le développement de l'énergie éolienne pose, en termes de planification, exploitation et gestion des futurs systèmes de fourniture d'énergie, des défis que la libéralisation du marché de l'électricité depuis les années 1990 n'a fait que renforcer.

Nous analyserons ici les principaux obstacles à l'intégration à grande échelle de l'énergie éolienne dans les systèmes électrique avant de nous intéresser à quelques solutions nées de la recherche en cours, en matière d'intégration de l'éolienne aux systèmes électriques.

Aujourd'hui, les grandes éoliennes de réseaux ont couramment un diamètre d'environ 100 m pour une puissance nominale de 5MW et on attend des modèles encore plus grands. En ce qui concerne les éoliennes hors-réseau, elles sont généralement beaucoup plus petites et leurs critères de rentabilité commerciale diffèrent car l'utilisation de combustibles importés accroît les coûts de production. La part de l'énergie éolienne devrait croître en raison de son faible impact environnemental. Son déploiement au Danemark, en Allemagne, en Irlande, au Royaume-Uni et ailleurs dans le monde devrait

Introduction générale

contribuer à renforcer la croissance de la capacité de production d'électricité d'origine éolienne, qui pourrait atteindre 200 000 MW dans un avenir très proche.

Parmi ces différents types de structures éoliennes, la génératrice asynchrone à double alimentation, rend les systèmes à vitesse variables plus attractifs. Ce type de machine permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien.

La machine synchrone à aimant permanent est également caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible et de faibles inductances. Toutes ces caractéristiques offrent à la machine synchrone à aimants permanents des performances intéressantes, un rendement meilleur et facilement contrôlable, ce qui fait d'elle une sérieuse concurrente de la machine asynchrone.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation à attaque directe.

Nous allons entamer ce travail avec un premier chapitre qui traitera des généralités sur les systèmes éoliens et les différents défauts de la **MADA**, à commencer par quelques statistiques sur la production mondiale et la production des pays considérés comme de grands producteurs, sans oublier de parler du cas Algérien. Puis nous allons nous intéresser à différents types d'éoliennes existant en abordant leurs différentes structures, leurs fonctionnements, leurs qualités et éventuellement leurs défauts. Ensuite, nous allons donner quelques notions théoriques sur les calculs de base qui permettent de contrôler le fonctionnement de notre système par la suite. Nous allons également citer quelques structures composant la turbine éolienne associée à sa génératrice et ces annexes.

Dans le deuxième chapitre, nous allons modéliser la **MADA** dans les cas de fonctionnement sain. La modélisation va être établie en se basant principalement sur les équations électriques de la machine. Les équations dynamiques de la machine, vont être exploitées pour mettre au point une simulation informatique en temps réel. En suite, nous allons décrire l'étude d'une cascade basée sur deux convertisseurs **MLI** à deux niveaux (redresseur à deux niveaux commandés par la stratégie hystérésis et onduleur à deux

Introduction générale

niveaux commandé par la stratégie Triangulo-sinusoïdale) associés à la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le troisième chapitre, Nous allons établir un modèle mathématique qui permettra de simuler le comportement de l'éolienne dans un cadre de fonctionnement bien défini. En suite, nous allons établir la commande vectorielle de la **MADA** en régime sain qui permettra de faire fonctionner la machine en mode génératrice.

Le quatrième chapitre est logé sur le diagnostic de MADA en défaut de court-circuit statorique et rotorique lié à la chaîne. Les variations des grandeurs ne sont pas remarquables pour le domaine temporelle ce qui nous a amené à les traiter sur le domaine fréquentielle en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT).

Enfin, ce travail se terminera par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

1.1. Introduction

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale en énergie. Cette augmentation se traduit, en réalité, par une augmentation des prix du pétrole qui représente la source la plus importante de l'énergie.

Les réserves mondiales de pétrole diminuent de plus en plus et dans les années à venir il n'y aura plus assez de pétrole pour couvrir la demande. Le climat de la terre évolue vers le mauvais et les sources naturelles d'eau se raréfient.

L'énergie nucléaire n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique. L'utilisation de ces sources conventionnelles est alors limitée ou n'est pas encouragée pour des raisons liées à l'environnement. Pour toutes ces raisons le monde se dirige vers les sources renouvelables, le soleil, le vent, les courants sous-marins et d'autres pour produire de l'électricité.

Actuellement l'énergie renouvelable n'est qu'une infime partie de l'énergie produite mais cette dernière va augmenter de plus en plus. Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante.

1.2. Historique de l'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans environ avant J.-C. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-

C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour mouliner le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV^e siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et au Danemark, vers le milieu du XIX^e siècle, le nombre de moulin est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent ont commencé à disparaître progressivement [3].

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

1.3. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences [4].

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produit étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière.

1.4. Contexte actuel

L'Algérie à l'instar des autres pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier, et ce en donnant beaucoup d'importance aux études réalisées dans ce domaine notamment celles qui sont dédiées au cas Algérien malgré la prédominance de l'énergie solaire. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : Le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays [5].

La carte représentée en *Figure 1.1* montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les côtes côtières d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au Sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière à montrer clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventés que le reste des saisons et que le printemps est le plus venté. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait exception avec une

vitesse plus faible en été qu'en Hiver. D'un autre côté, des régions telles que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisées par une vitesse relativement constante tout au long de l'année [5].

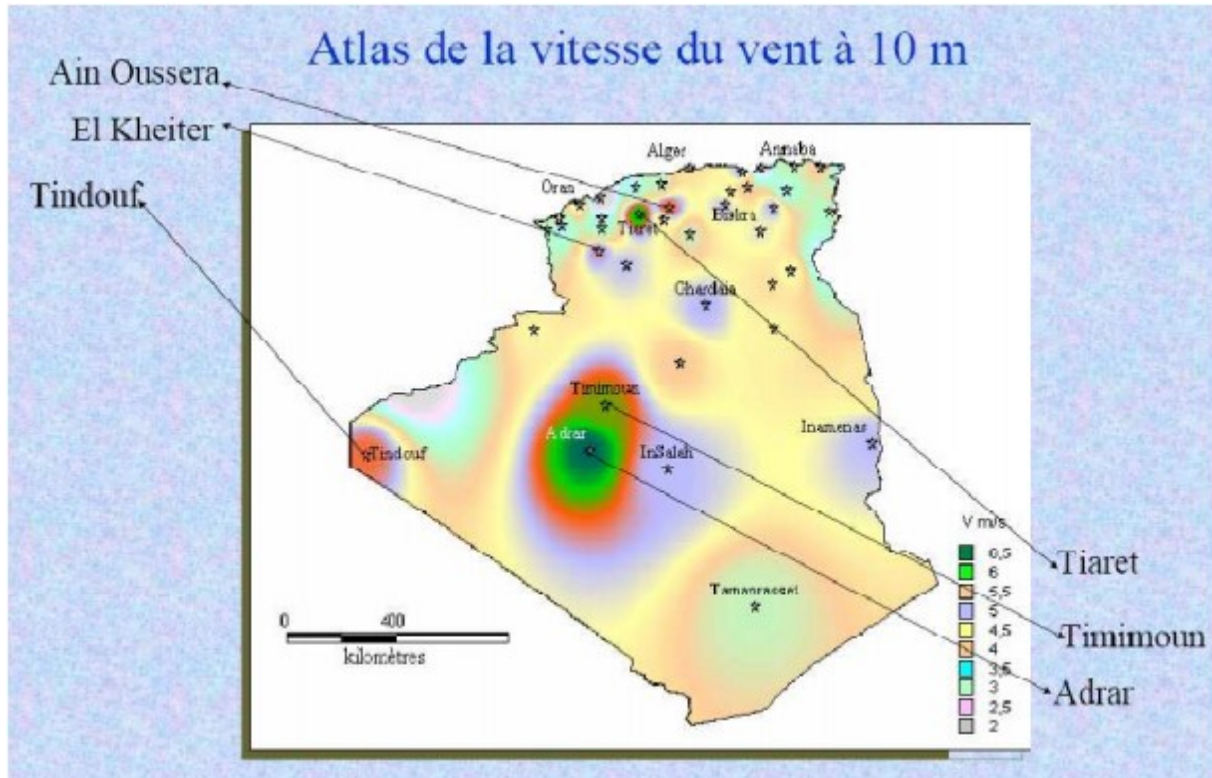


Figure 1.1. Carte de potentiel éolien en Algérie.

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour installer des parcs éoliens en vue d'alimenter des régions isolées ou de permettre aux régions qui baignent dans le vent d'avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé. Des projets de ce genre sont en phase d'étude et d'autres commencent à voir le jour tel que la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 **MW** par le groupe français Vergnet.

1.5. Principe de fonctionnement

Un système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Cette conversion se fait en deux étapes [6], [7]:

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

L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [8].

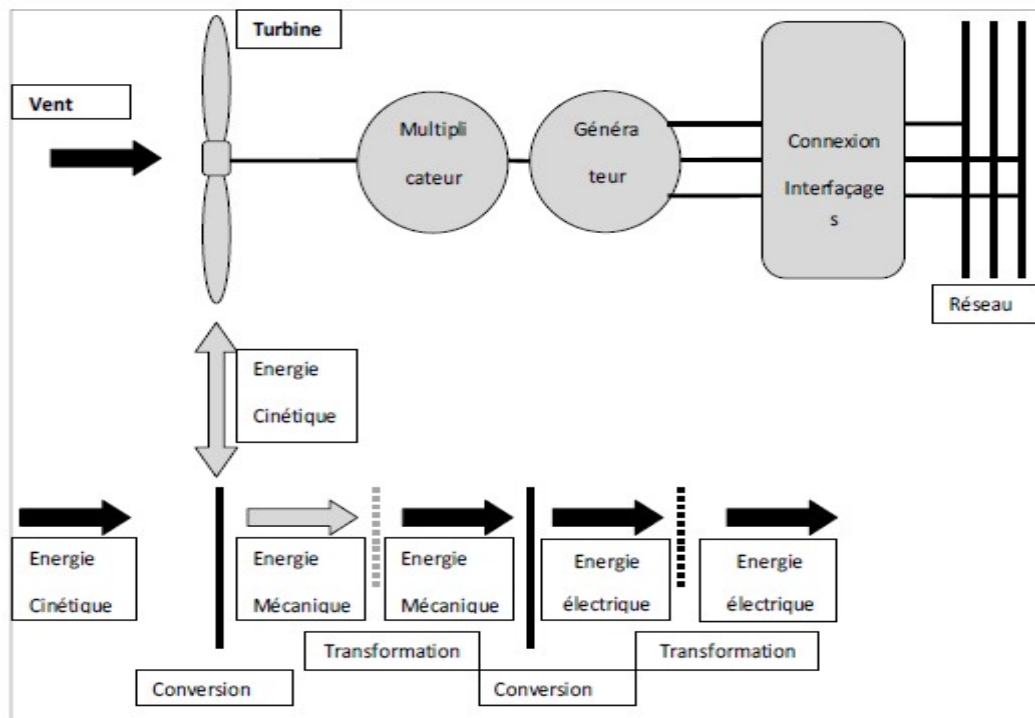


Figure 1.2. Principe de conversion d'énergie.

1.6. Classification des éoliennes

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

1.6.1. Par rapport à leurs axes

a. Eoliennes à axe vertical

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

a.1. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical

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

Avantages

- Les organes de commande et le générateur sont au niveau du sol donc facilement accessibles.
- L'éolienne reçoit le vent de n'importe quelle direction.
- Conception simple des pales et prix de fabrication réduit [9].

Inconvénients

- Difficulté de contrôle des pales en cas de survitesse.
- La présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité.
- La surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [9].

b. 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, [10]. La voile peut être placée avant la nacelle (face au vent), aussi elle peut être placée derrière la nacelle (sous le vent), comme on le voit sur la **Figure 1.3** Type de montage de la voile.

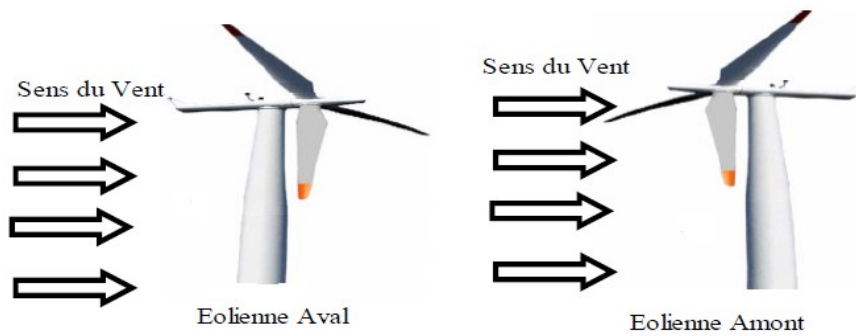


Figure 1.3. Type de montage de la voilure.

b.1 Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides *Figure 1.4.b* et *Figure 1.4.c* ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids et de leur rendement élevé. Par contre, elles présentent l'inconvénient de démarrer difficilement.

b.2 Eoliennes lentes

Les éoliennes lentes *Figure 1.4.a* sont munies d'un grand nombre de pales entre (20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse.



Fig (a)

Fig (b)

Fig (c)

Figure 1.4. Les éoliennes à axe horizontal.

b.3. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal

Avantages

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

Inconvénients

- Conception plus complexe à exiger en raison du besoin de commande des pales.
- Le générateur et le multiplicateur de vitesse devraient être montés sur une tour, de ce fait l'entretien devient difficile [9].

1.7. Principaux composants d'une éolienne

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

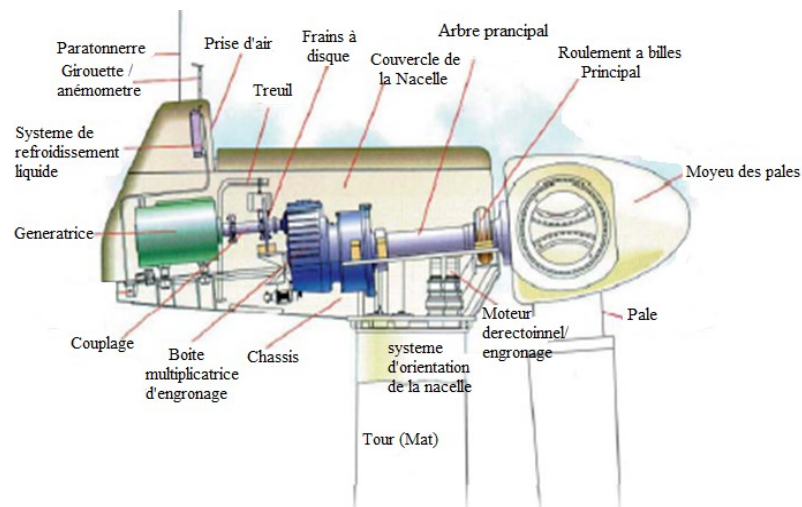


Figure 1.5. Principaux composants d'une éolienne.

1.7.1. La tour (mat)

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol (entre 60 et 100 mètres) [11]. La tour a une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur est disposée les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle.



Figure 1.6. Montage d'un mât tubulaire.



Figure 1.7. Tour en treillis métalliques.

1.7.2. La nacelle

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



Figure 1.8. La Nacelle.

1.7.3. Les pales

Les pales sont généralement en fibre de verre, Leur diamètre varie en fonction de la puissance désirée (entre 7 m et 72 m) [11]. Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations.



Figure 1.9. Les Pales.

1.7.4. Le rotor

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



Figure 1.10. Le rotor.

a. Les rotors à vitesse fixe

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût [12].

b. Les rotors à vitesse variable

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [12].

c. Intérêts de la vitesse variable

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

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

1.7.5. Frein

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

1.7.6. La génératrice

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



Figure 1.11. Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes.

1.7.7. Le multiplicateur

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



Figure 1.12. Le multiplicateur.

1.7.8. L'arbre de transmission

Il est composé de deux arbres:

- **L'arbre primaire:** cet arbre transmet l'effort fourni par le rotor au multiplicateur. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre (20 - 40 tr/min) [11].
- **L'arbre secondaire:** il entraîne la génératrice à des vitesses élevées (environ 2000 tours/minute) et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence *Figure 1.13* [12].

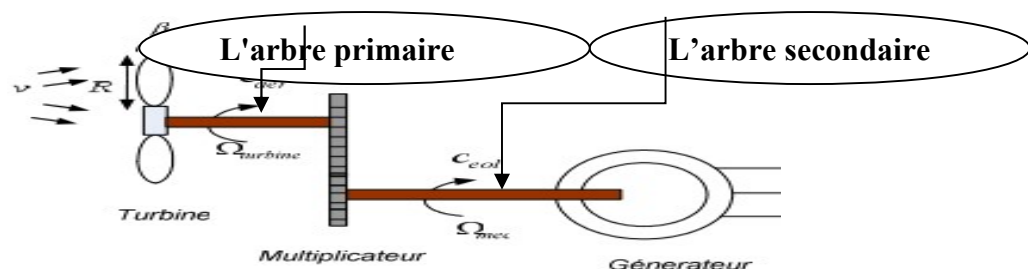


Figure 1.13. L'arbre de transmission.

1.7.9. Le système de refroidissement

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

1.7.10. Les outils de mesure du vent

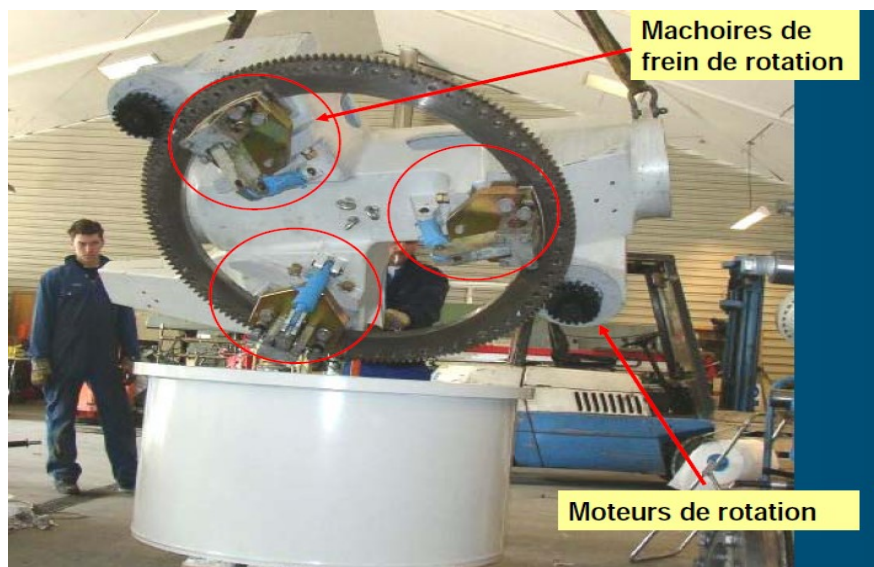
Nous avons deux types: Une girouette *Figure 1.14* pour évaluer la direction du vent et un anémomètre *Figure 1.15* pour en mesurer la vitesse.

a. Anémomètre

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de control commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 **m/s**. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25 **m/s** pour assurer la protection de l'éolienne [11].

*Figure 1.14. Girouette.**Figure 1.15. Anémomètre.***1.7.11. Système d'orientation de la nacelle**

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

*Figure 1.16. Système d'orientation de la nacelle.*

1.7.12. Système de contrôle (commande)

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de surchauffe du multiplicateur ou de génératrice le système arrête automatiquement l'éolienne, et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique [13].



Figure 1.17. Système de contrôle (commande).

1.7.13. La fondation en béton

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



Figure 1.18. La fondation en béton.

1.8. Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

La nacelle telle qu'elle est présentée dans la *Figure 1.5* pour rôle de capter l'énergie cinétique du vent et la transformer en énergie électrique. Cette opération est basée sur un certain nombre de lois physiques qui sont présentées dans ce qui suit.

1.8.1. Loi fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

a. Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la *Figure 1.19*, sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse de vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse de vent après passage à travers le rotor V_2 . soit V_{12} [14, 15].

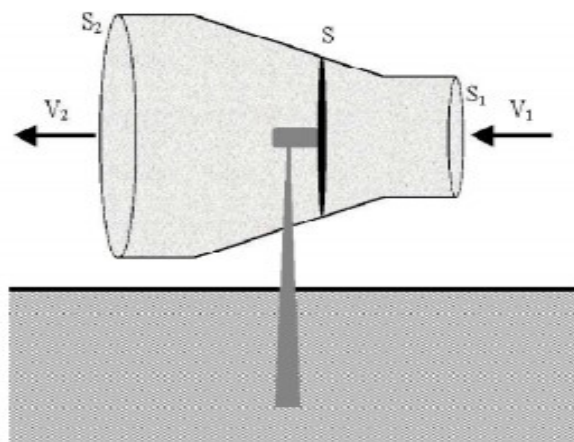


Figure 1.19. Tube de courant à travers une éolienne [14, 15].

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho * S(V_1 + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m * (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression (équation 1.1):

$$P_m = \frac{\rho * S * (V_1 + V_2) * (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 . La puissance théorique P_{th} correspondante serait alors :

$$P_{th} = \frac{\rho * S * V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors donné par:

$$\frac{P_m}{P_{th}} = \frac{\left(\left(1 + \frac{V_1}{V_2} \right) * \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) \right)}{2} = C_p \quad (1.5)$$

Figure 1.20 représente l'évolution du ratio $\frac{P_m}{P_{th}}$ en fonction de $\frac{V_1}{V_2}$. On s'aperçoit que ce ratio appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximum de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [15].

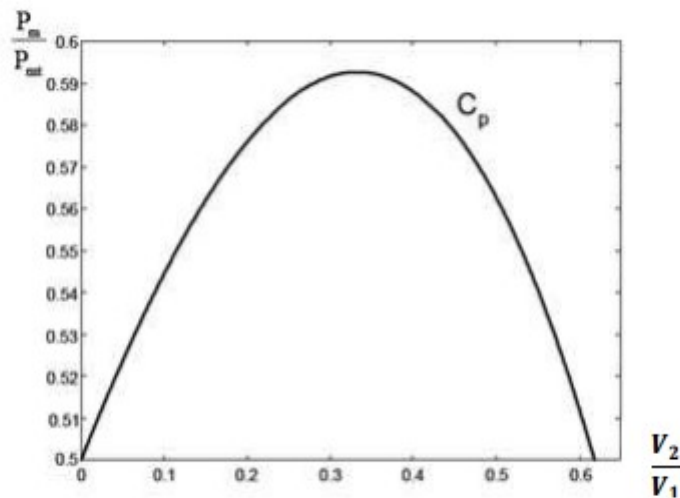


Figure 1.20. Courbe caractéristique du coefficient de puissance [14].

La courbe de la **Figure 1.20** représente la forme la plus répandue du coefficient de puissance et qui caractérise une éolienne tripale à axe horizontal. Cette forme peut, par contre changer selon le type de l'éolienne (à axe horizontal ou vertical), ou bien selon le nombre de pales comme le montre la **Figure 1.21**. Cette figure montre que pour des éoliennes dont la vitesse relative est comprise entre 0 et 10 appelées aussi éolienne lentes, la courbe $C_p = f(\lambda)$ a une forme en cloche plutôt étroite et pointue. Alors que pour des éoliennes rapides et dont la vitesse relative est comprise entre 10 et 20, la forme de cette courbe est plutôt large et aplatie au sommet [15].

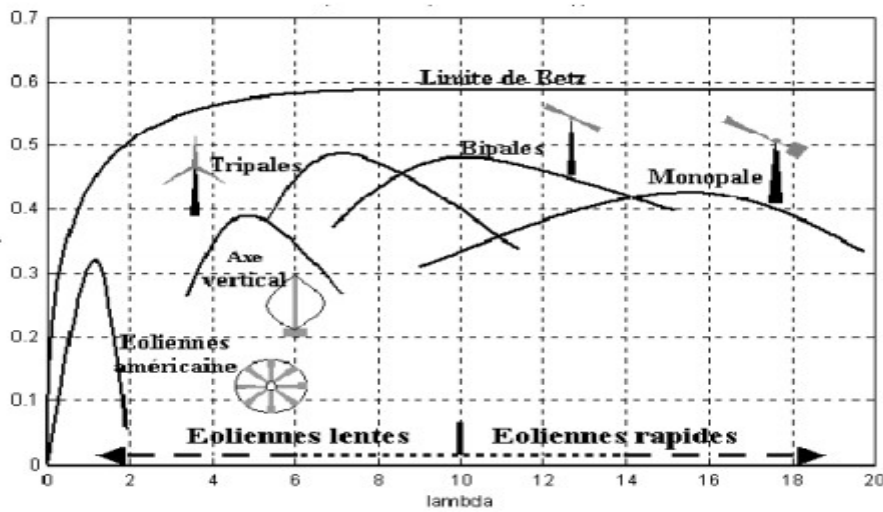


Figure 1.21. Coefficient de puissance pour différents types d'éolienne [15]

b. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'une turbine s'exprime par :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{th}} P_{th} = C_p * P_{th} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \pi \rho R^2 V_1^3 \quad (1.6)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{trb} \cdot R}{V_1} \quad (1.7)$$

Ω_1 est la vitesse de rotation avant multiplicateur et R le rayon de turbine.

La relation (1.7) permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent.

Figure 1.22 Coefficient de puissance pour différents types d'éolienne représente la caractéristique obtenue pour une valeur donnée de la vitesse de rotation.

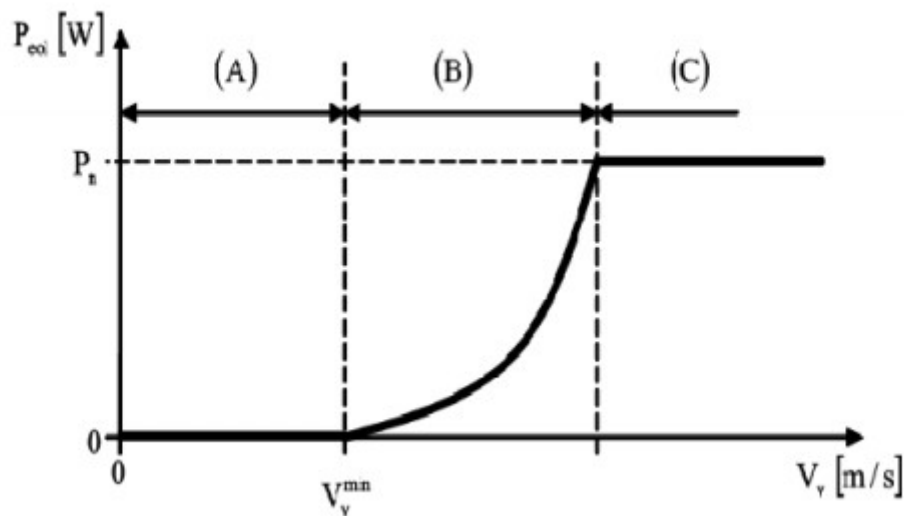


Figure 1.22. Courbe de puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [15].

Après une partie **(A)** où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse de démarrage V_v^{min} , une section de fonctionnement normal existe. Si on extrait alors la puissance maximale de la turbine (**MPPT**) celle-ci évolue alors selon le cube de la vitesse du vent **(B)**. Quand la puissance nominale P_n est atteinte, elle doit être limitée **(C)**. Au-delà d'une certaine limite de vitesse du vent, la turbine doit être arrêtée [15].

Il existe quatre méthodes principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent [16].

La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable. Elle est plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à forte puissance (quelques centaines de **KW**). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure.

La seconde technique est passive. Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons de ces deux technologies.

La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (une rotation

autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue.

La dernière méthode qui permet la régulation de la puissance éolienne consiste à faire varier la vitesse de rotation Ω_{mec} par une action électrique. Par le biais de la génératrice accouplée à une chaîne de conversion statique pilotée pour gérer le transfert d'énergie, la vitesse de rotation peut être pilotée selon le point de fonctionnement souhaité. Le plus souvent, dans les turbines classiques à axe horizontal, le dispositif de réglage à fréquence variable est associé à un réglage mécanique.

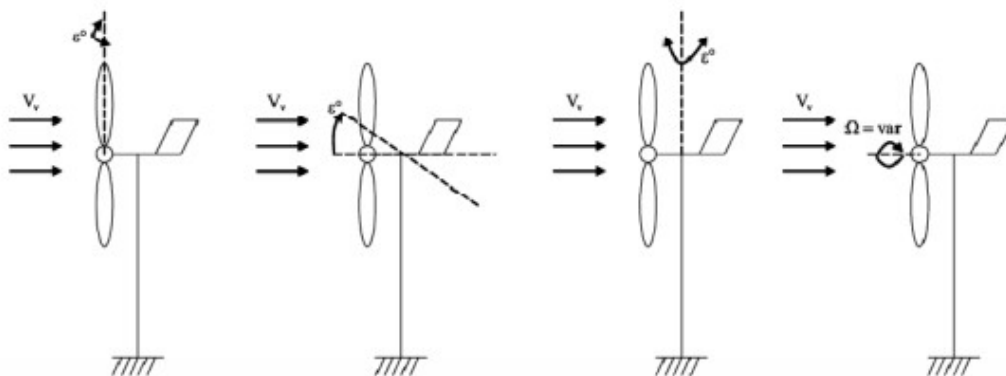


Figure 1.23. Orientation de la nacelle en vue de la limitation de la puissance [16].

Ces différentes méthodes de limitation de la puissance éolienne laissent croire que la conversion de l'énergie éolienne telle que décrite par les équations précédents est simplifiée du moment qu'on ne prend pas en considération un certain nombre de contraintes physiques liées aux turbulences du vent, les matériaux dont l'aérogénérateur est construit et les obstacles pouvant perturber l'écoulement du vent ...etc.

1.8.2. Contraintes mécaniques associées à la conversion de l'énergie éolienne

L'expression du couple éolien donne le couple moyen présent sur l'arbre de la turbine correspondant au vent équivalent moyen. Il faut, pour mieux décrire le comportement, prendre en compte l'existence des couples pulsatoires, qui entraîneront des fluctuations de puissance, et qui sont générés par les irrégularités déterministes du champ de vitesses [17].

Ces phénomènes sont dus en particulier à l'effet de cisaillement, l'effet du passage d'une pale devant la tour (effet d'ombre), sans oublier d'ajouter également les effets des imperfections de construction (asymétrie).

Ces différentes contraintes peuvent être classées selon leur effet temporel sur le rotor et selon le caractère dynamique de la conversion.

- Les contraintes liées à l'effet temporel :
 - Les charges stationnaires, indépendantes du temps, lorsque le rotor tourne à une vitesse fixe: vitesse du vent constant, forces centrifuges.
 - Les charges stationnaires dans le temps, mais pas dans l'espace, qui provoquent des contraintes cycliques sur le rotor telles que l'augmentation du vent avec hauteur et l'interférence entre la tour et l'écoulement du vent.
 - Les forces de gravité dues au poids des pales qui entraînent aussi des fluctuations périodiques.
 - Les contraintes non périodiques dues aux turbulences du vent.
- Les contraintes liées au caractère dynamique de la conversion:
 - Effet d'ombre ou effet de tour: L'effet de tour est produit du fait de la résistance de la turbine à l'écoulement du vent, perturbe en amont et en aval. Loin de l'influence de la tour, la vitesse de vent est supposée constante alors qu'elle augmente à l'approche de la tour et diminue ensuite.
 - Phénomène de cisaillement: Le phénomène de cisaillement du vent produit également des oscillations de couple provoquées par le gradient de vitesse du vent le long du secteur balayé par les pales [17].

1.9. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne

En vue de l'exploitation de l'énergie fournie par le vent, plusieurs systèmes peuvent être utilisés. Nous pouvons les classer en deux catégories:

- Les systèmes à vitesse fixe.
- Les systèmes à vitesse variable.

1.9.1. Les systèmes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est

alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paire de pôle de la génératrice. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet, C'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un faible coût. Cela permet une installation rapide de centaines de **KW** de générateurs éoliens. Cependant, Avec la mise en place très progressive de projets d'éoliennes dont la puissance est supérieure au **MW**, Ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir pour cette gamme de puissance. La configuration à vitesse fixe peut être représentée d'une manière simplifiée par le schéma de la **Figure 1.24** La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, Le multiplicateur de vitesse et la génératrice [18].

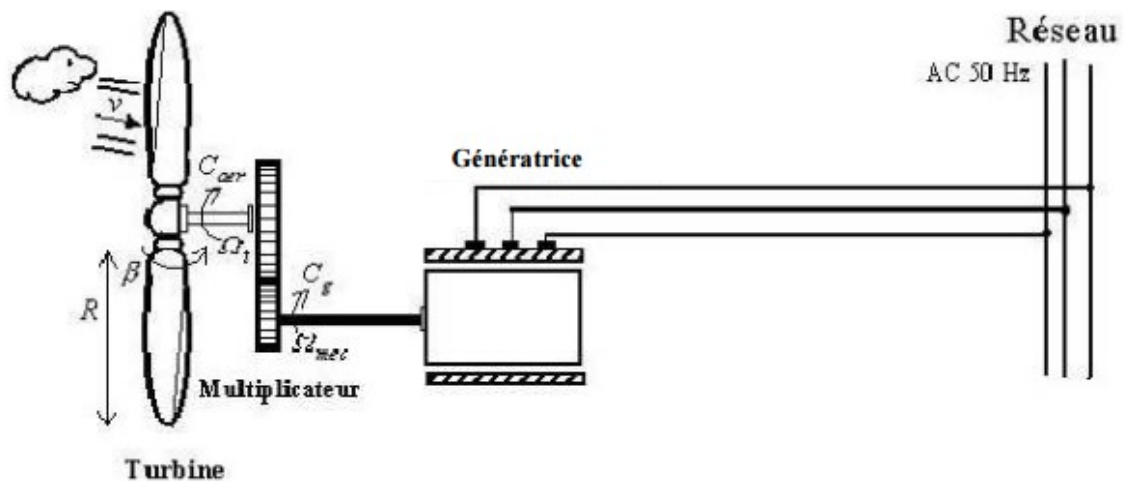


Figure 1.24. Eolienne à vitesse fixe [18].

1.9.2. Les systèmes à vitesse variable

Les deux structures d'éoliennes à vitesse variable sont représentées sur la **Figure 1.25**. La configuration de la **Figure 1.25.a** est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la **Figure 1.25.b**, est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique [18].

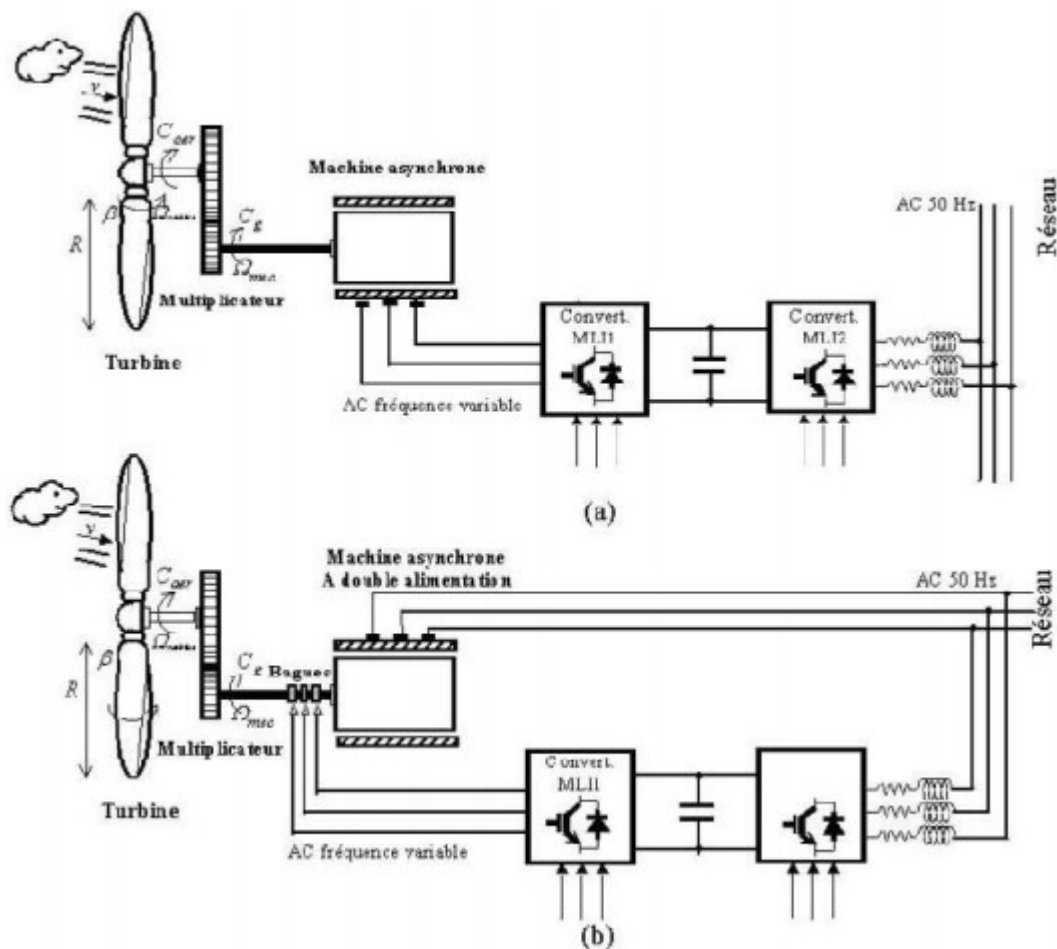


Figure 1.25. Eoliennes fonctionnant à vitesse variable [18].

1.10. Différents Systems utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne

1.10.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur asynchrone est largement utilisé. C'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

La robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur les bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Il existe plusieurs types de configurations utilisant la machine asynchrone dans toutes ses formes (Machine asynchrone à rotor bobiné, Machine asynchrone à cage, Machine asynchrone à double stator, MADA etc.) [10].

1.10.2. Systèmes utilisant la machine synchrone

Malgré toutes les caractéristiques et avantages des machines asynchrones, Ces dernières présentent le défaut d'imposer la présence du multiplicateur de vitesse car elles possèdent un couple mécanique insuffisant pour un couplage mécanique directe aux pales. Par contre les machines synchrones sont connues pour fournir un couple important, à dimensions géométriques convenables. C'est pourquoi elles offrent l'avantage de se passer du multiplicateur de vitesse, Notamment si le nombre de pôles est important [10].

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, Sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous multiple de la pulsation des courants statoriques.

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion.

Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau *Figure (1.26)* ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

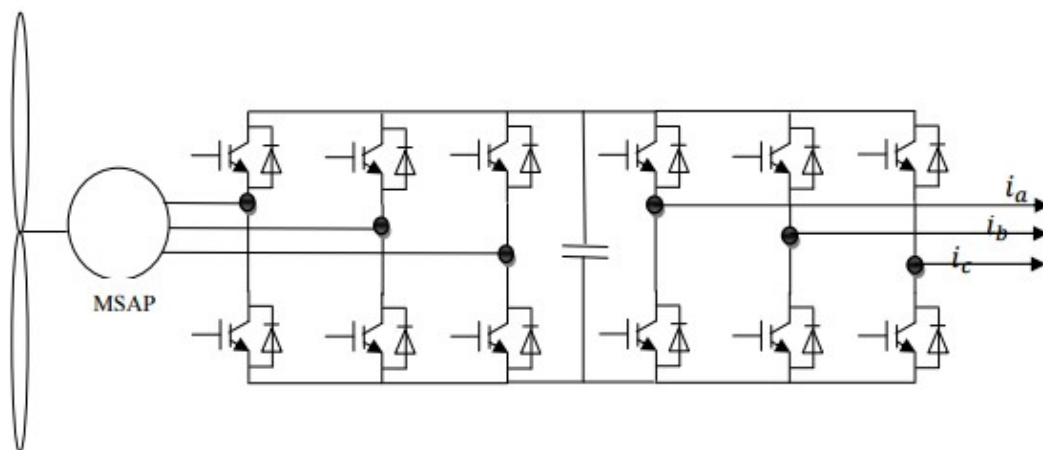


Figure 1.26. Machine synchrone entraînée par une turbine éolienne et reliée au réseau par un dispositif redresseur MLI- onduleur MLI.

Dans le cas de la machine à rotor bobiné, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur

connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on le remplace souvent par des aimants permanent. Toutefois, certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de matériaux rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couple électromagnétique qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de la durée de vie de la connexion d'une machine synchrone au réseau [10].

La liaison avec le réseau se fait via un convertisseur connecté au stator de la machine. C'est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, Ce qui permet d'éviter les variations importantes de la tension sur les enroulements statoriques. Ce redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant une tension suffisante à l'onduleur **MLI** pour les faibles vitesses de rotation. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes [11].

Le champ magnétique de la génératrice synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si elle possède un nombre suffisant de pôle, elle peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesse. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimant permanent (**MSAP**) est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 **kw**, le générateur synchrone est plus coûteux et plus complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente. Ces avantages sont la motivation principale du choix sur le quel se base ce travail, à savoir l'étude d'un système de générateur d'énergie éolienne utilisant une **MADA**, d'une puissance de 1000 **Watts**.

1.11. État de l'art du diagnostic de la machine asynchrone

Les machines électriques sont très utilisées dans l'industrie et surtout la machine asynchrone qui, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. La quasi-absence d'entretien a permis d'étendre son domaine d'utilisation à tous les domaines industriels et en particulier dans les domaines de pointe comme l'aéronautique, le

nucléaire, la chimie ou encore les éoliennes. Malgré sa robustesse, cette machine subit, au cours de sa durée de vie, des sollicitations qui la rendent potentiellement défaillante. Cette défaillance peut avoir de graves conséquences sur le processus industriel en général [43].

Dans les chaînes industrielles, le maillon faible est la machine électrique, car sa panne paralyse immédiatement la production et entraîne une perte sèche très importante. Une maintenance dite « prédictive », doit être donc assurée afin de prévenir à temps les défauts susceptibles de se produire dans les machines (phase statorique mise en court-circuit, rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit, excentricités, défauts de roulements,...). Les études actuelles portent sur les petits défauts (par exemple : un court-circuit entre spires), ceci afin de prévenir les grands. Généralement, le diagnostic des défauts est fait à partir du spectre des grandeurs électriques. Les fréquences de défaut dépendent non seulement du défaut, mais aussi du glissement et du choix de l'alimentation.

1.11.1. Cause des défauts

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

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

1.11.2. Présentation des défauts

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

- Défauts affectant le stator.
- Défauts affectant le rotor.

a. Défauts affectant le stator

Ces défauts sont généralement liés à la dégradation de l'isolation électrique. Ils sont généralement connus comme des défauts de court-circuit entre une ou plusieurs phases et/ou la terre. Rappelons que les défauts statoriques peuvent être : des courts-circuits entre spires des enroulements de la même phase, ou de phases différentes, des courts-circuits phase-terre, ou une ouverture de phase, provoquant tous une dissymétrie au niveau du stator. **Figure 1.27**

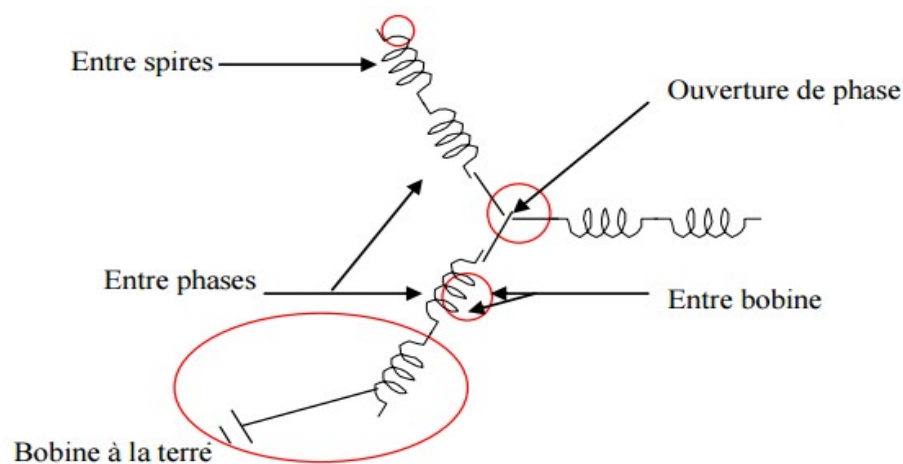


Figure 1.27. Représentation des différents défauts statoriques possibles

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

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

b. Défauts affectant le rotor

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

b.1. Rotor à cage d'écureuil

Les défauts affectant ce type peuvent être :

b.1.1. Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique

La détection de ce type de défaillances est souvent difficile vu le fait que la machine continue de fonctionner en présence de ces défaillances. Ces dernières ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et modifient la valeur du couple électromagnétique, qui va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [44].

b.1.2. Défaut de roulements

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

b.1.3. Défauts d'excentricités

L'excentricité de la machine est le résultat d'uniformité d'entrefer. Ce défaut peut apparaître suite à une flexion de l'arbre, un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, de l'usure du roulement ou encore d'un manque de précision lors de la construction de la machine. Il existe deux types d'excentricité *Figure 1.28*.

➤ L'excentricité statique

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

➤ **L'excentricité dynamique**

Pour ce qui est de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation, et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Les causes de ce type d'excentricité sont, la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le défaut d'alignement du roulement, la résonance mécanique à la vitesse critique [45].

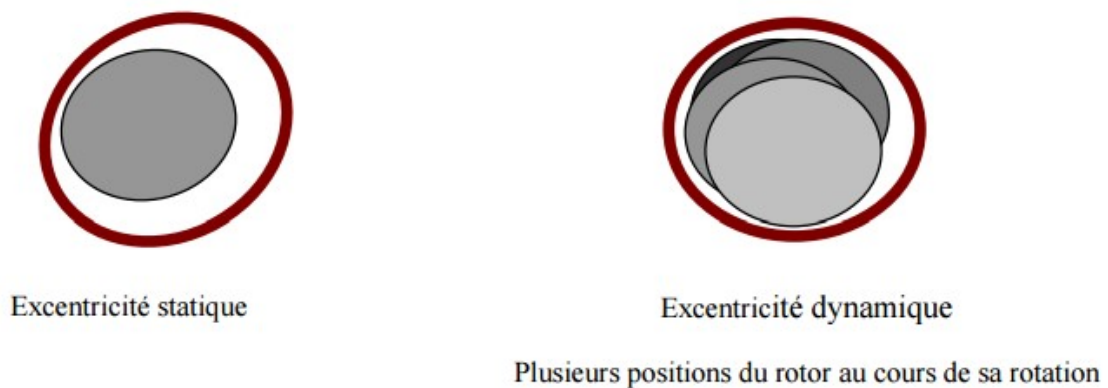


Figure 1.28. Représentation de l'excentricité statique et dynamique

b.2. Rotor bobiné

b.2.1. Défaut de courts-circuits

Les spires court-circuitées dans les générateurs de puissance à rotor bobiné affectent le fonctionnement de la machine, provoquent des niveaux élevés de vibration ; et donc la détection précoce est importante [46]. Sachant que le bobinage triphasé du rotor est similaire à celui du stator ; donc les défauts qui peuvent affecter le bobinage rotorique est de même type que les défauts statoriques tel que des courts-circuits entre spires des enroulements de la même phase, ou de phases différentes, des courts-circuits phase-terre, ou une ouverture de phase, qui provoquent une dissymétrie au niveau du rotor.

b.2.2. Défaut de contact balai – bague

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

1.12. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne et son importance en tant qu'énergie verte. Nous avons également présenté une évaluation du potentiel éolien Algérien afin d'avoir une idée sur l'importance de l'investissement dans ce créneau. Nous avons également consacré ce chapitre à la description d'une éolienne, le calcul de la puissance extraite de la rotation de celle-ci, et les objectifs derrière le contrôle de son fonctionnement. En suite, Nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique et les différents types de machines utilisées. la comparaison entre ces machines a dégagé l'idée de consacrer notre étude à un système utilisant une machine asynchrone à double alimentation (**MADA**).

Enfin, nous avons donné un aperçu sur les différents défauts de la machine asynchrone à double alimentation.

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire notre travail en deux parties :

Un modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation dans les cas de fonctionnement sain va être établi en se basant principalement sur les équations électriques de la machine. Les équations dynamiques de la machine, vont être exploitées pour mettre au point une simulation informatique en temps réel. Le logiciel informatique Matlab est utilisé.

Les onduleurs à source de tension ont été habituellement considérés comme les convertisseurs de puissance les plus adaptés aux entraînements à courant alternatif. Principalement, parce que ces onduleurs peuvent être appliqués facilement pour les systèmes à modulation de largeur d'impulsions (*MLI*). De même, ils assurent une commande du moteur facile et effective puisque son circuit de puissance offre la possibilité de travailler sur une large gamme de fréquences et de tensions de charge. C'est pourquoi l'étude de l'association onduleur-moteur asynchrone constitue un vaste thème de recherche dans les laboratoires d'électrotechnique. La majorité de ces travaux ont conduit d'une part, à améliorer la conception des onduleurs et d'autre part à développer de nouvelles techniques de commande des onduleurs améliorant ainsi les performances de cette association. Dans le souci de fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les redresseurs à MLI sont proposés comme solution avancée de dépollution des réseaux électriques. En effet, les redresseurs à MLI peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

Première partie :**Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation****2.2. Fonctionnement et modélisation de la MADA****2.2.1. Fonctionnement de la MADA**

La **MADA** présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écureuil et un rotor constitué d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (balais). Sa robustesse est légèrement diminuée par rapport à une machine asynchrone classique à cause de ce système bague/balais.

Une fois le stator de la machine connecté au réseau électrique, un flux magnétique apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de paires de pôles dans le bobinage et du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromagnétiques (**f.e.m**) dans les enroulements rotoriques.

Le rapport entre les (**f.e.m**) crée au rotor et au stator est défini par [28] :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r \omega_s - p\Omega}{N_s \omega_r} = r \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad (2 - 1)$$

Avec:

N_r et **N_s** respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique.

P : le nombre de pair de pôle.

r : le rapport de transformation rotor/stator équivalent au rapport des nombres de spires rotorique et statorique.

ω_s et **ω_e** : respectivement les pulsations statoriques et électriques de la **MADA**.

En définissant le glissement par:

$$g = \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad (2 - 2)$$

L'équation (4-1) devient alors :

$$\frac{E_r}{E_s} = g \cdot r \quad (2 - 3)$$

Les courants au stator et au rotor sont alors liés comme dans un transformateur parfait:

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{1}{r} \quad (2 - 4)$$

Donc, le rapport entre les puissances apparentes rotorique S_r et statorique S_s s'exprime par :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{i_r E_r}{i_s E_s} = g \quad (2 - 5)$$

La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse en agissant sur la puissance apparente rotorique via le glissement g .

La machine asynchrone à double alimentation étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité.

2.2.2. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation « sain »

La modélisation de la machine asynchrone sera établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes [29] :

- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoches négligeable.
- La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements sont constantes et l'effet de peau négligeable.
- On admet que la **f.m.m** créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- La machine est symétrique, par conséquent, la somme des courant et des tensions est égale à zéro.
- Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :
 - L'additive des flux,
 - La constance des inductances propres,
 - La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

a. Modèle de la MADA dans le plan « ABC »

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor. Elle peut être schématisée par la **Figure (2.1)**. Les phases sont désignées par a, b, c pour le stator et A, B, C pour le rotor. L'angle électrique θ définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statoriques et rotoriques. [42]

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

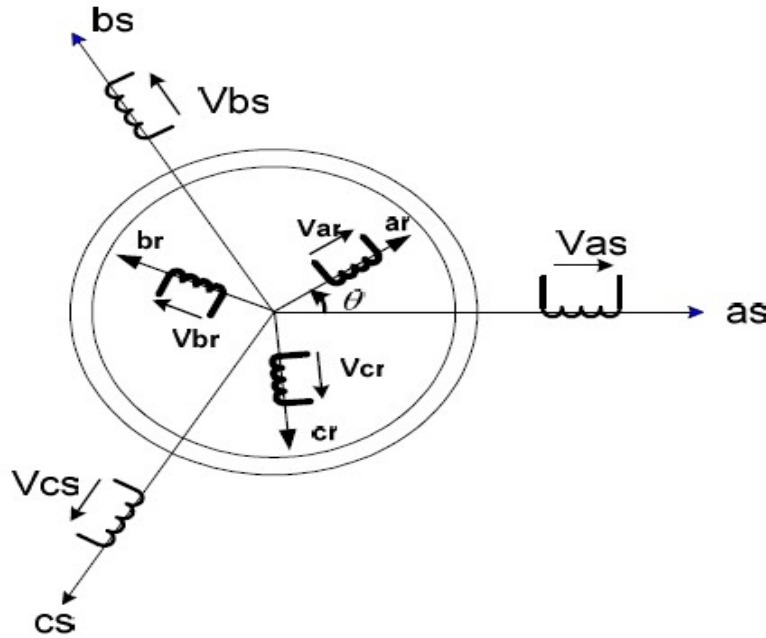


Figure 2.1. Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.

as, bs, cs : phase du stator.

Ar, Br, Cr : phase du rotor.

En utilisant l'approche des circuits couplés magnétiquement, la loi d'Ohm et la loi de Faraday et en tenant compte des hypothèses cités ci-dessus, le comportement dynamique de la **MADA** peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant [29].

a.1 Equations électriques de la machine

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

Au stator

$$[V_{s,abc}] = [R_s] \cdot [I_{s,abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{s,abc}] \quad (2.6)$$

Au rotor

$$[V_{r,abc}] = [R_r] \cdot [I_{r,abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{r,abc}] \quad (2.7)$$

$$[V_{r,abc}] \neq 0$$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} [\phi_{s,abc}] = [L_{ss}] \cdot [I_{s,abc}] + [M_{sr}] \cdot [I_{r,abc}] \\ [\phi_{r,abc}] = [L_{rr}] \cdot [I_{r,abc}] + [M_{rs}] \cdot [I_{s,abc}] \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec

$$[V_{s,abc}] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [I_{s,abc}] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [V_{r,abc}] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; [I_{r,abc}] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

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

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

Les flux sont donnés par:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} M_s + l_s & -\frac{M_s}{2} & -\frac{M_s}{2} \\ -\frac{M_s}{2} & M_s + l_s & -\frac{M_s}{2} \\ -\frac{M_s}{2} & -\frac{M_s}{2} & M_s + l_s \end{bmatrix} [L_{rr}] = \begin{bmatrix} M_r + l_r & -\frac{M_r}{2} & -\frac{M_r}{2} \\ -\frac{M_r}{2} & M_r + l_r & -\frac{M_r}{2} \\ -\frac{M_r}{2} & -\frac{M_r}{2} & M_r + l_r \end{bmatrix}$$

l_s, l_r : Inductances de fuite statoriques et rotoriques.

M_s, M_r : Inductances mutuelles.

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

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Avec :

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

En remplaçant (2.8) dans (2.6) et (2.7) on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_{s,abc}] = [R_s] \cdot [I_{s,abc}] + \frac{d}{dt}([L_{ss}] \cdot [I_s]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}] \cdot [I_{r,abc}]) \\ [V_{r2,abc}] = [R_r] \cdot [I_{r,abc}] + \frac{d}{dt}([L_{rr}] \cdot [I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}] \cdot [I_{s,abc}]) \end{cases} \quad (2.10)$$

a.2. Equations mécaniques de la machine

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

$$C_{em} = p[I_{s,abc}]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] \cdot [I_{r,abc}]) \quad (2.11)$$

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

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f_{vis} \cdot \omega \quad (2.12)$$

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

a.3. MISE SOUS FORME D'EQUATIONS D'ETAT

Vu la nécessité de représenter le modèle de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état, nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[I_{as}, I_{bs}, I_{cs}, I_{ar}, I_{br}, I_{cr}]^t$ comme vecteur d'état. Après le calcul, nous aboutissons au système suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{as}}{dt} = l(1,1).V_{as} + l(1,2).V_{bs} + l(1,3).V_{cs} + l(1,4).V_{ar} + l(1,5).V_{br} + l(1,6).V_{cr} \\ \quad + h(1,1).I_{as} + h(1,2).I_{bs} + h(1,3).I_{cs} + h(1,4).I_{ar} + h(1,5).I_{br} + h(1,6).I_{cr} \\ \frac{dI_{bs}}{dt} = l(2,1).V_{as} + l(2,2).V_{bs} + l(2,3).V_{cs} + l(2,4).V_{ar} + l(2,5).V_{br} + l(2,6).V_{cr} \\ \quad + h(2,1).I_{as} + h(2,2).I_{bs} + h(2,3).I_{cs} + h(2,4).I_{ar} + h(2,5).I_{br} + h(2,6).I_{cr} \\ \frac{dI_{cs}}{dt} = l(3,1).V_{as} + l(3,2).V_{bs} + l(3,3).V_{cs} + l(3,4).V_{ar} + l(3,5).V_{br} + l(3,6).V_{cr} \\ \quad + h(3,1).I_{as} + h(3,2).I_{bs} + h(3,3).I_{cs} + h(3,4).I_{ar} + h(3,5).I_{br} + h(3,6).I_{cr} \\ \frac{dI_{ar}}{dt} = l(4,1).V_{as} + l(4,2).V_{bs} + l(4,3).V_{cs} + l(4,4).V_{ar} + l(4,5).V_{br} + l(4,6).V_{cr} \\ \quad + h(4,1).I_{as} + h(4,2).I_{bs} + h(4,3).I_{cs} + h(4,4).I_{ar} + h(4,5).I_{br} + h(4,6).I_{cr} \\ \frac{dI_{br}}{dt} = l(5,1).V_{as} + l(5,2).V_{bs} + l(5,3).V_{cs} + l(5,4).V_{ar} + l(5,5).V_{br} + l(5,6).V_{cr} \\ \quad + h(5,1).I_{as} + h(5,2).I_{bs} + h(5,3).I_{cs} + h(5,4).I_{ar} + h(5,5).I_{br} + h(5,6).I_{cr} \\ \frac{dI_{cr}}{dt} = l(6,1).V_{as} + l(6,2).V_{bs} + l(6,3).V_{cs} + l(6,4).V_{ar} + l(6,5).V_{br} + l(6,6).V_{cr} \\ \quad + h(6,1).I_{as} + h(6,2).I_{bs} + h(6,3).I_{cs} + h(6,4).I_{ar} + h(6,5).I_{br} + h(6,6).I_{cr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}C_{em} - \frac{1}{J}C_r - \frac{f_r}{J}\Omega \\ \frac{d\theta}{dt} = \Omega.p \end{array} \right.$$

Avec :

$$[l] = [A]^{-1} \quad \text{et} \quad [A] = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix}$$

$$[h] = -[l].[B] \quad \text{et} \quad [B] = \begin{bmatrix} R_{ss} & M_{srd} \\ M_{rsd} & R_{rr} \end{bmatrix}$$

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

b. Modèle de la MADA dans le repère d-q

b.1. La transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [30].

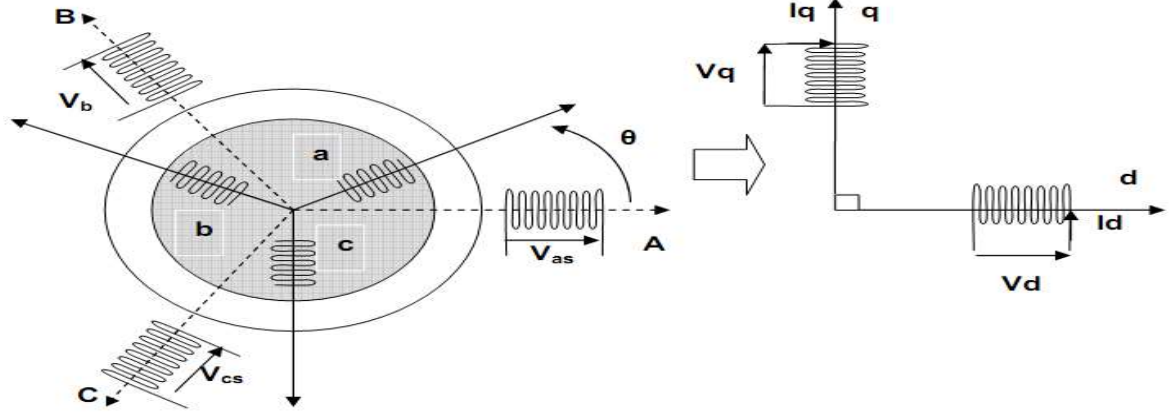


Figure 2.2. Passage du triphasé au biphasé La matrice de transformation.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Tel que :

$L_s = l_s - M_s$ Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$ Inductance cyclique rotorique.

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

Les équations électriques sont :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - w_e \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + w_e \phi_{ds} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (w_e - w) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (w_e - w) \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.14)$$

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

b.2. Choix de la référence

b.2.1. Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_e}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -w \quad (2.15)$$

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

b.2.2. Référentiel lié au rotor

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

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_e}{dt} = w \quad (2.16)$$

b.2.3. Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $w_e = w_s$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines [31]. Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de **PARK** lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - w_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + w_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (w_s - w) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (w_s - w) \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.17)$$

Avec :

$$\begin{cases} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \\ \frac{J}{p} \frac{dw_m}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \end{cases} \quad (2.18)$$

b.3. MISE SOUS FORME D'EQUATIONS D'ETAT

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état, nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[\phi_{ds}, \phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}]^t$ comme vecteur d'état et les grandeurs V_{dr}, V_{qr} comme variable de commande [32]. Après le calcul, nous aboutissons au système suivant:

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \phi_{ds} - w_s \phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \phi_{qs} - w_s \phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} + (w_s - w) i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot w \phi_{qs} - \beta V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - (w_s - w) i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} + \beta \cdot w \phi_{ds} - \beta V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{qr} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{p\mu}{J} (\phi_{qs} i_{dr} - \phi_{ds} i_{qr}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_{vis}}{J} w \end{cases} \quad (2.19)$$

Avec

$$\begin{cases} \alpha_s = \frac{R_s}{L_s} \\ \sigma_r = L_r \cdot \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \\ \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{L_s^2 \sigma_r} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \beta = \frac{M}{L_s \sigma_r} \\ \mu = \frac{3M}{2L_s} \end{cases}$$

2.4. Résultat de simulation

La simulation numérique est bien connue aujourd'hui dans le domaine des machines électriques. Elle nous permet de modéliser, d'analyser et de simuler les systèmes avec beaucoup plus de précision. De nos jours il existe toute une panoplie de logiciels pour les machines électriques. Afin de simuler la **MADA**, nous avons opté pour le logiciel **MATLAB**. Les données de la machine utilisée en simulation sont données en annexe.

2.4.1. Simulation pour un fonctionnement sain de la MADA

Nous avons simulé la **MADA** alimenté par réseau pour démarrage à vide et en appliquant un couple de charge à **t= 1 s** de valeur égale au couple nominale, **Cr = 26 Nm**.

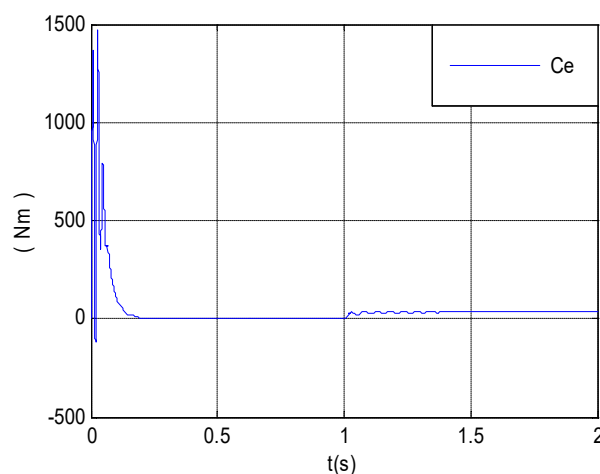


Figure 2.3. Couple électromagnétique

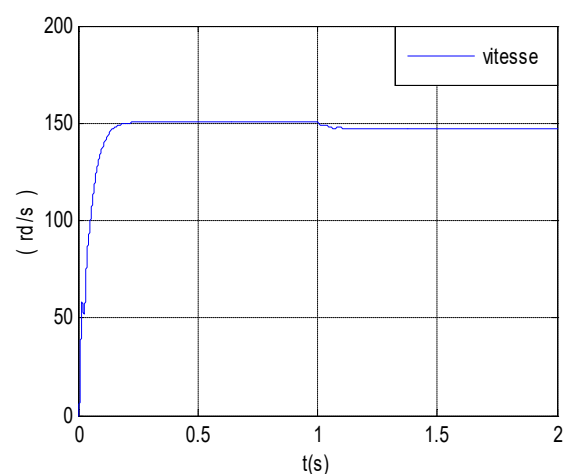


Figure 2.4. Vitesse de rotation

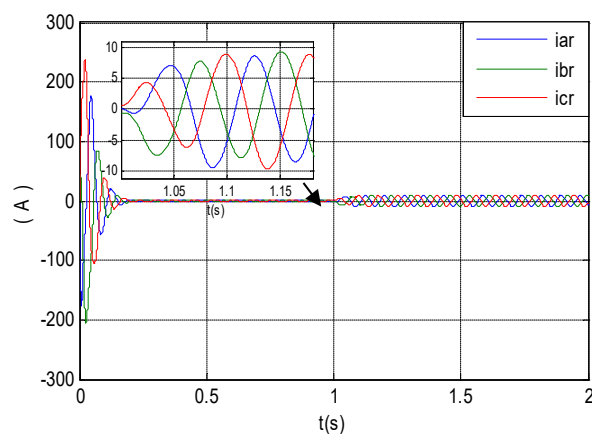


Figure 2.5. Courant rotorique réelle

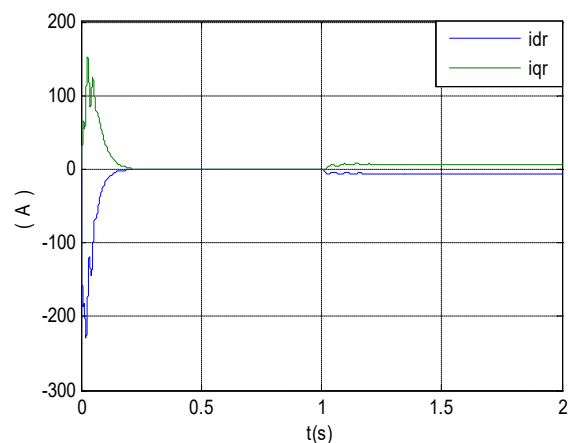


Figure 2.6. Courant rotorique de

Park

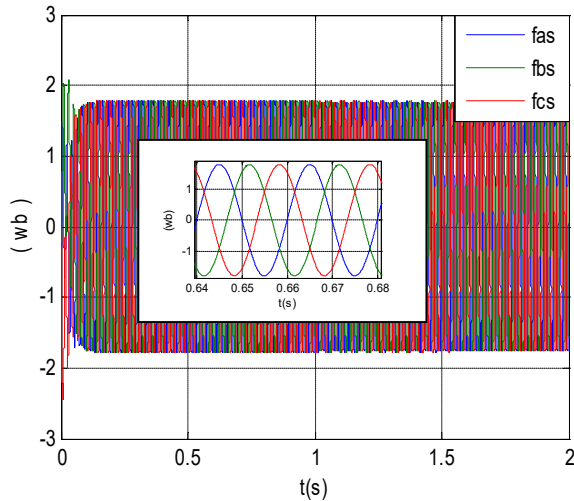


Figure 2.7. Flux statorique réelle

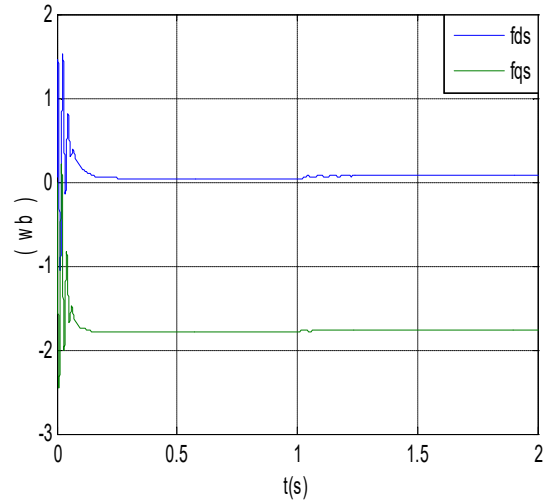


Figure 2.8. Flux statorique de Park

Interprétation

On remarque que toutes les grandeurs de la machine ont un régime transitoire oscillant. La vitesse réelle à vide atteint une valeur très proche de la vitesse nominale 150 rad/s au bout d'un temps égal à 0.2s. Ce démarrage rapide a permis d'avoir un établissement rapide du couple électromagnétique au régime transitoire. Les courants rotoriques (i_{dr} , i_{qr}) se stabilisent à des valeurs proches de zéro au bout d'un temps égal à 0.2s, quant aux flux statorique (ϕ_{ds} , ϕ_{qs}) ils prennent tous des régimes transitoires oscillatoires et se stabilisent aux valeurs respectivement de 0.035Wb, -1.79 Wb.

Si on appliquant un couple résistant égale au couple nominale $C_r = C_{en} = 26$, le couple électromagnétique augmente afin de compenser le couple résistant, cela induit une légère diminution de vitesse qui traduit un glissement supplémentaire correspondant au glissement nominal de la machine, et une augmentation du courant i_{qr} et diminution du courant i_{dr} . De même pour les flux statoriques (ϕ_{ds} , ϕ_{qs}) augmentent à l'instant de l'application de la charge, chose qui explique le couplage naturel existant entre le flux et le couple.

Deuxième partie

Modélisation de la cascade redresseur-onduleur-MADA

2.5. Modélisation de redresseur MLI à bonde hystérésis

Afin de pouvoir disposer d'une tension continue pour alimenter l'onduleur qui pilote la machine asynchrone à double alimentation, nous avons choisi d'utiliser un redresseur à modulation de Largeur d'Impulsion, [33], [34] pour 2 raisons principales:

- Utiliser un redresseur réversible en courant afin de permettre le transfert de la puissance de glissement entre le rotor et le réseau, ce qui permet les fonctionnements en hyper ou hypo synchronisme.
- Mettre en œuvre un redresseur qui génère peu ou pas de perturbation sur le réseau électrique par propagation de courants harmoniques.

Toutes les stratégies de commande possibles utilisées avec l'onduleur triphasé à deux niveaux [35], [36] sont aussi utilisables pour la commande du redresseur triphasé à deux niveaux [37]. On distingue pour le convertisseur à deux niveaux les stratégies suivantes :

- Triangulo-sinusoïdale à échantillonnage naturel et régulier.
- Commande optimisée avec ou sans la double modulation.
- Commande algébrique et vectorielle.
- Commande par hystérésis en courant.

Dans cette partie de notre travail, nous avons choisi la stratégie de commande par hystérésis pour commander notre redresseur, afin d'avoir un courant de réseau pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension. La commande en courant par hystérésis [35] présente une bonne dynamique et une implantation simple.

2.5.1. Structure générale du redresseur MLI

La technologie employée consiste à modifier la structure interne du redresseur en remplaçant les thyristors par des interrupteurs entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture : transistor **MOSFET** pour les moyennes et petites puissances, transistors **IGBT** ou thyristors **GTO** pour les fortes puissances, en anti parallèle avec des diodes. Pour la

commande on utilise la technique de la modulation de largeur d'impulsion. La **Figure (2.9)** montre le schéma de principe d'un redresseur **MLI** [35].

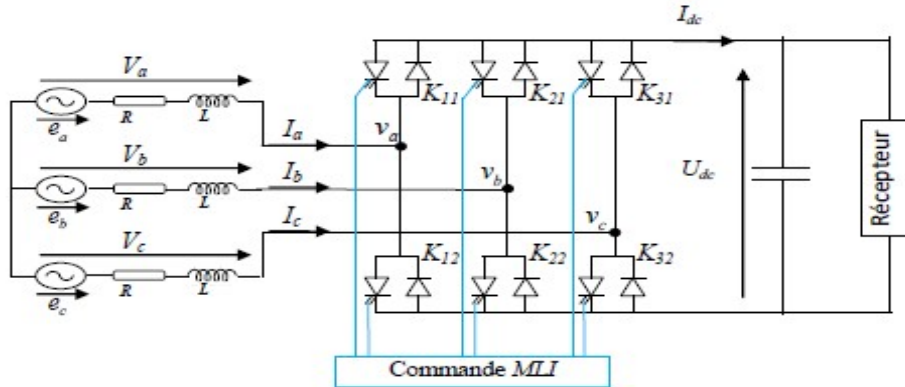


Figure 2.9. Schéma de principe d'un redresseur **MLI** [36].

2.5.2. Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI

La réversibilité en courant de l'onduleur **MLI** de tension autorise son fonctionnement en redresseur **MLI** de courant. Il s'agit alors d'alimenter une charge (passive ou active) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant prélevé sur ce réseau étant sinusoïdale et éventuellement, en phase avec la tension. On peut donc, avec un redresseur **MLI**, obtenir un facteur de puissance très proche de l'unité. On peut aussi régler, par le contrôle, l'énergie réactive absorbée ou fournie. Toutefois, ce redresseur peut être à structure courant ou à structure tension. Le courant de ligne est commandé par la chute de tension de la ligne produite par l'inductance L , et la résistance R de la ligne et la tension d'entrée du redresseur V_{abc} . Le pont redresseur est constitué de trois bras. Chaque bras comporte deux transistors bipolaires (thyristors) en antiparallèles avec des diodes comme il est représenté dans la **Figure (II.10)**, chaque interrupteur peut être commandé en ouverture et en fermeture. La tension d'entrée V_{abc} , est en fonction des états de ces interrupteurs.

2.5.3. Modèle de redresseur MLI

Les tensions entre les lignes sont donnés par :

$$\begin{cases} v_{ab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ v_{bc} = (S_b - S_c)U_{dc} \\ v_{ca} = (S_c - S_a)U_{dc} \end{cases} \quad (2.20)$$

D'où on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{cases} v_a = f_a U_{dc} \\ v_b = f_b U_{dc} \\ v_c = f_c U_{dc} \end{cases} \quad (2.21)$$

Avec :

$$\begin{cases} f_a = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \\ f_c = \frac{2S_c - (S_b + S_a)}{3} \end{cases} \quad (2.22)$$

2.5.4. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé

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

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

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

$$v_n = U_{dc} \left(\frac{2}{3} S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad (2.24)$$

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

2.5.5. Le récepteur (la charge)

Ce bloc est constitué d'une capacité **C** (pour diminuer les ondulations de la tension redressée) placée en parallèle avec une résistance **R**, modélisant la charge continue **Figure (2.11)**. La tension U_{dc} aux bornes de la charge et le courant redressé, est donnée par les deux expressions **(2.25)** et **(2.26)**.

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme suit:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_c \quad (2.25)$$

Le courant dans la capacité peut s'écrire aussi:

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (2.26)$$

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

➤ A vide : $i_{ch} = 0$

➤ Pour une charge résistive R :

$$i_{ch} = \frac{U_c}{R} \quad (2.27)$$

Donc :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (2.28)$$

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

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - U_{dc} \left(\frac{2}{3} S_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_a - U_{dc} \left(\frac{2}{3} S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - U_{dc} \left(\frac{2}{3} S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_b - U_{dc} \left(\frac{2}{3} S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - U_{dc} \left(\frac{2}{3} S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_c - U_{dc} \left(\frac{2}{3} S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \end{cases} \quad (2.29)$$

La combinaison des équations (2.28), (2.29) nous permet de tracer le schéma fonctionnel triphasé représenté dans la **Figure (2.10)**.

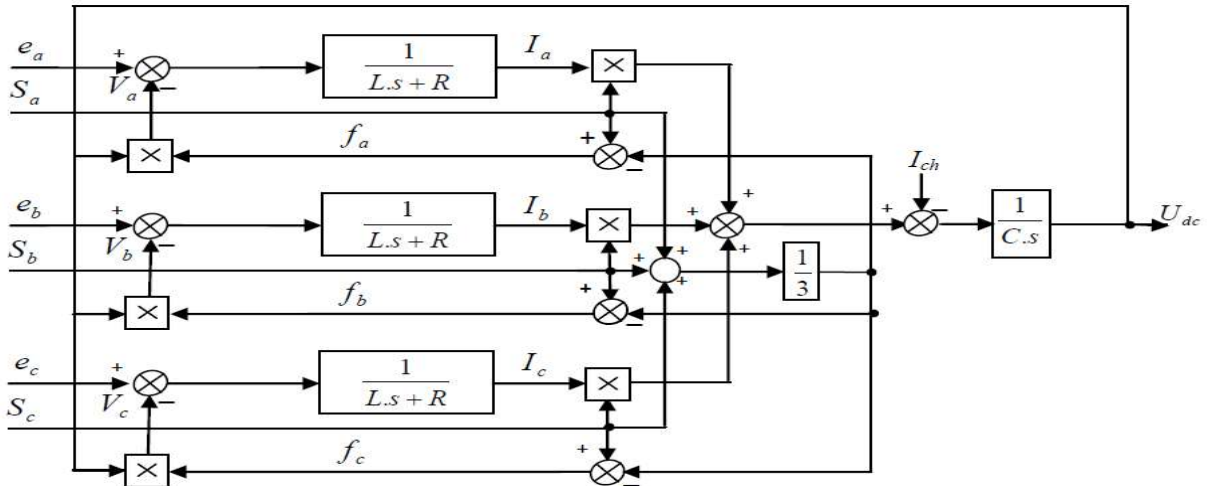


Figure 2.10. Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI

Le contrôle de la tension continue U_{dc} exige une boucle d'asservissement fermée. Pour cela, il faut régler cette tension de sortie en fonction de la charge utilisée. Pour accomplir cette tâche, la tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence U_{dc-ref} . La sortie du régulateur produit les ordres de commande pour les transistors du redresseur comme l'indique la **Figure (2.11)** [37].

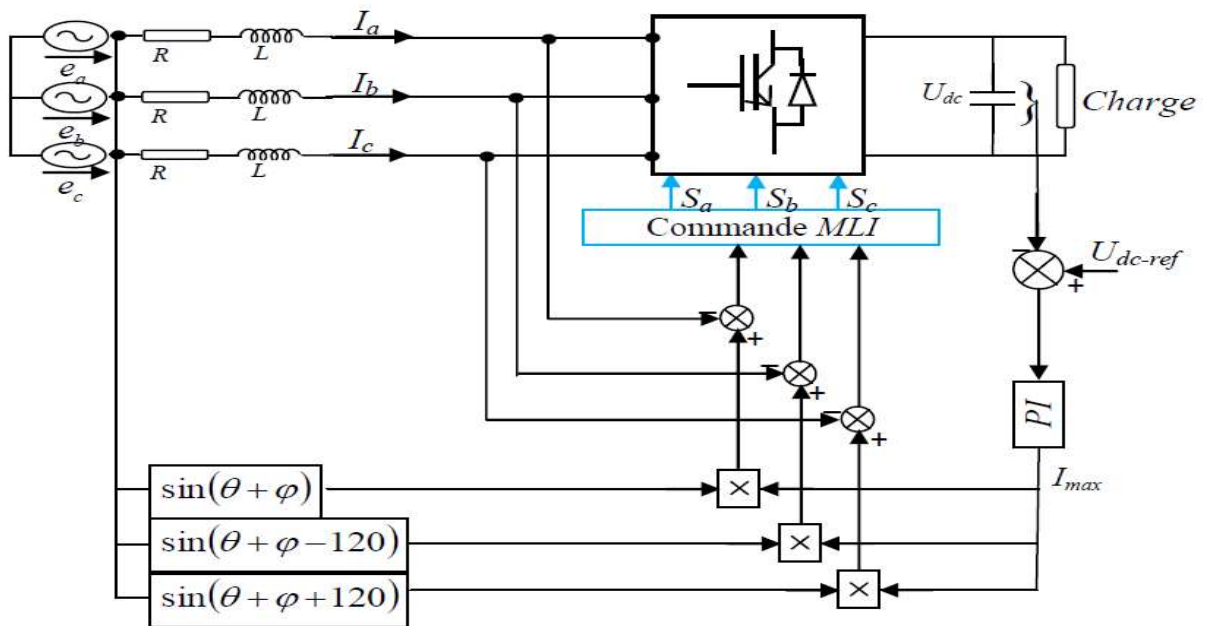


Figure 2.11. Redresseur MLI triphasé et sa commande

2.5.6. Commande de redresseur MLI par hystérésis en courant

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

a. Principe de commande par hystérésis en courant

Le principe du contrôle par hystérésis, consiste à maintenir le courant à l'intérieur d'une bande en quadrant sa référence. La différence entre le courant et sa référence est comparée à une bande fixe de largeur Di appelée bande ou fourchette d'hystérésis. Cette méthode permet le contrôle de la fréquence de commutation des interrupteurs par action sur la largeur Di c'est pourquoi les performances de cette stratégie sont fortement liées à la largeur Di de la bande d'hystérésis. Pour les redresseurs à deux niveaux, on a deux états de commande possibles pour un bras, et donc on utilise un régulateur à hystérésis à deux positions. L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$, et il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (ou largeur de la bande) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre $-H/2$ et $+H/2$ (c'est-à-dire, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas.

En utilisant la commande par hystérésis en courant dont l'algorithme est le suivant :

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

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

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

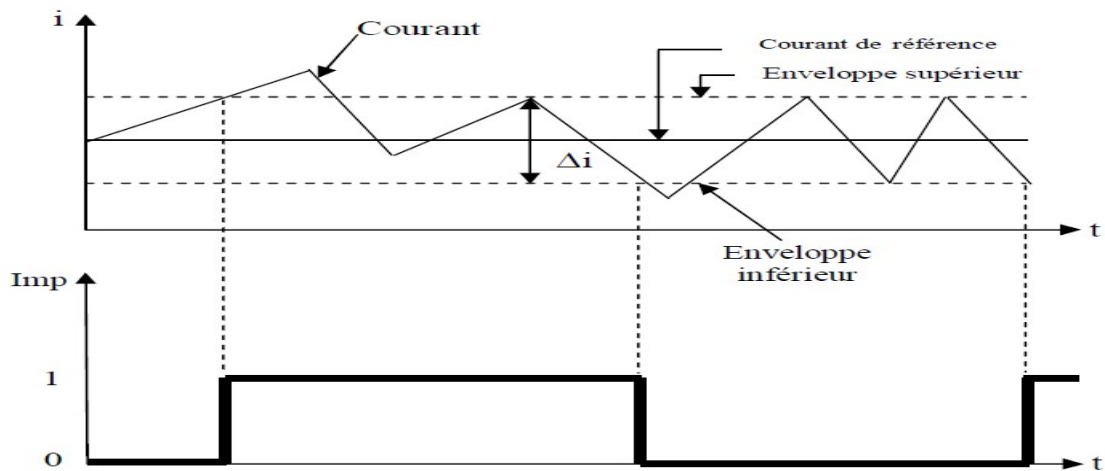


Figure 2.12. Principe du Contrôle par hystérésis.

Sortie du comparateur

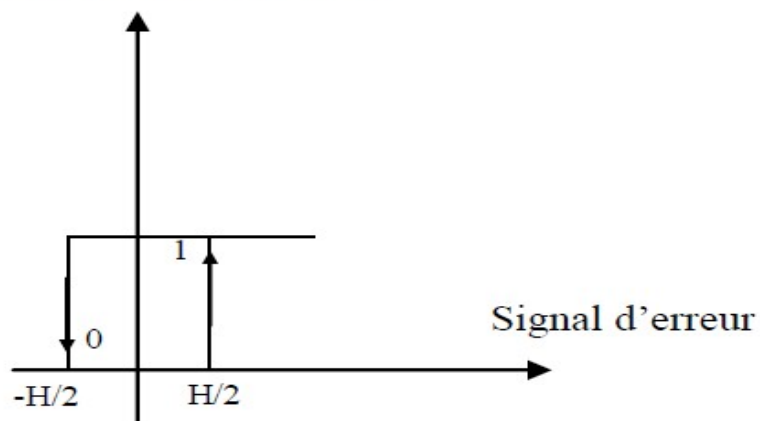


Figure 2.13. Modulateur MLI à bande d'hystérésis.

2.6. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique aujourd'hui. L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes variables à partir du réseau standard 220/380V, 50Hz. La

structure du convertisseur statique qui alimente la machine est constituée essentiellement, d'un pont redresseur (**AC/DC**) connecté au réseau. Après redressement, la tension (étage continu) est filtrée par des composants passifs **C** ou **LC**, pour être finalement appliquée à l'onduleur. L'onduleur qui est connecté à la machine, est constitué de trois bras formés d'interrupteurs électroniques choisis essentiellement selon la puissance et la fréquence de travail. Chaque bras compte deux composants de puissance complémentaires munis de diodes montées en antiparallèle. Un temps de retard doit exister pratiquement entre les interrupteurs hauts et bas d'un même bras afin d'éviter le court-circuit de la source continue. L'onduleur est commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion(**MLI**), appelée en anglais (Pulse With Modulation **PWM**). Il existe plusieurs techniques **PWM**, commandées par les utilisateurs des machines électriques [38].

2.6.1. Modèle mathématique de l'onduleur de tension

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

- **Si = 1** : le cas où l'interrupteur du haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- **Si = 0** : le cas où l'interrupteur du haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions v_{i0} en fonction des signaux de commande **Si** et en tenant compte du point fictif « 0 » représenté sur la **Figure (2.14)**.

$$v_{i0} = U_{dc} \left(S_i - \frac{1}{2} \right) \quad (2.30)$$

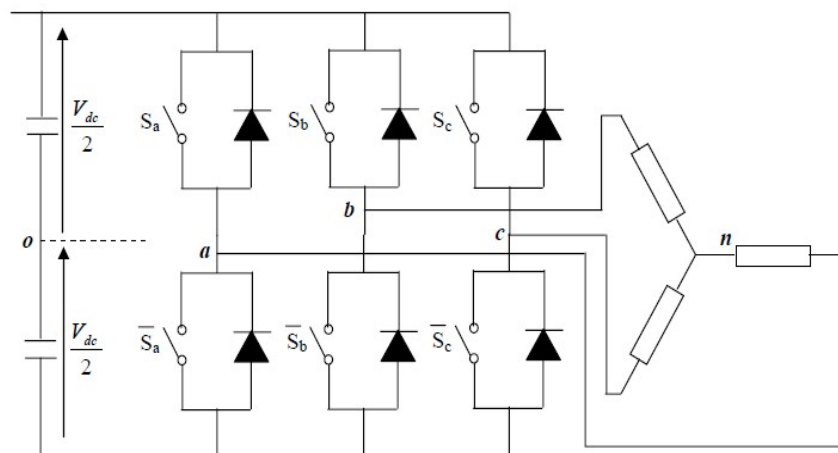


Figure 2.14. L'onduleur de tension associé à La machine

Soit 'n' le point neutre du côté alternatif, alors les trois tensions composées :

v_{ab} , v_{cb} et v_{ca} Sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{an} - v_{bn} \\ v_{bc} = v_{bn} - v_{cn} \\ v_{ca} = v_{cn} - v_{an} \end{cases} \quad (2.31)$$

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

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}(v_{ab} - v_{ca}) \\ v_{bn} = \frac{1}{3}(v_{bc} - v_{ab}) \\ v_{cn} = \frac{1}{3}(v_{ca} - v_{bc}) \end{cases} \quad (2.32)$$

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

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{a0} - v_{b0} \\ v_{bc} = v_{b0} - v_{c0} \\ v_{ca} = v_{c0} - v_{a0} \end{cases} \quad (2.33)$$

En remplaçant (2.32) dans (2.33) on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Des relations suivantes:

$$\begin{cases} v_{a0} = v_{an} - v_{n0} \\ v_{b0} = v_{bn} - v_{n0} \\ v_{c0} = v_{cn} - v_{n0} \end{cases} \quad (2.35)$$

L'utilisation de l'expression (2.35) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Les techniques **MLI** ou (**PWM**) ont fait l'objet de recherches intensives, un nombre important de méthodes, différentes de par leurs concepts et leurs performances ont été développées [38]. Le choix d'une technique dépend du type de la machine à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et la simplicité d'implantation de l'algorithme. Ce sont finalement des critères de coût et de performance

qui vont déterminer ce choix. Les critères de performances permettant d'évaluer et de comparer les qualités des différentes techniques **PWM**. Ils se résument en :

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

Parmi les nombreuses techniques **PWM**, deux d'entre elles seront considérées dans notre travail, la **STPWM** et la **SVPWM** [38].

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

La modulation Triangulo-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersective puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation Triangulo-sinusoïdale. Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance [39]. Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale :

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

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (2.37)$$

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

$$r = \frac{V_p}{V_r} \quad (2.38)$$

Le schéma de principe est donné par la **Figure (2.15)**:

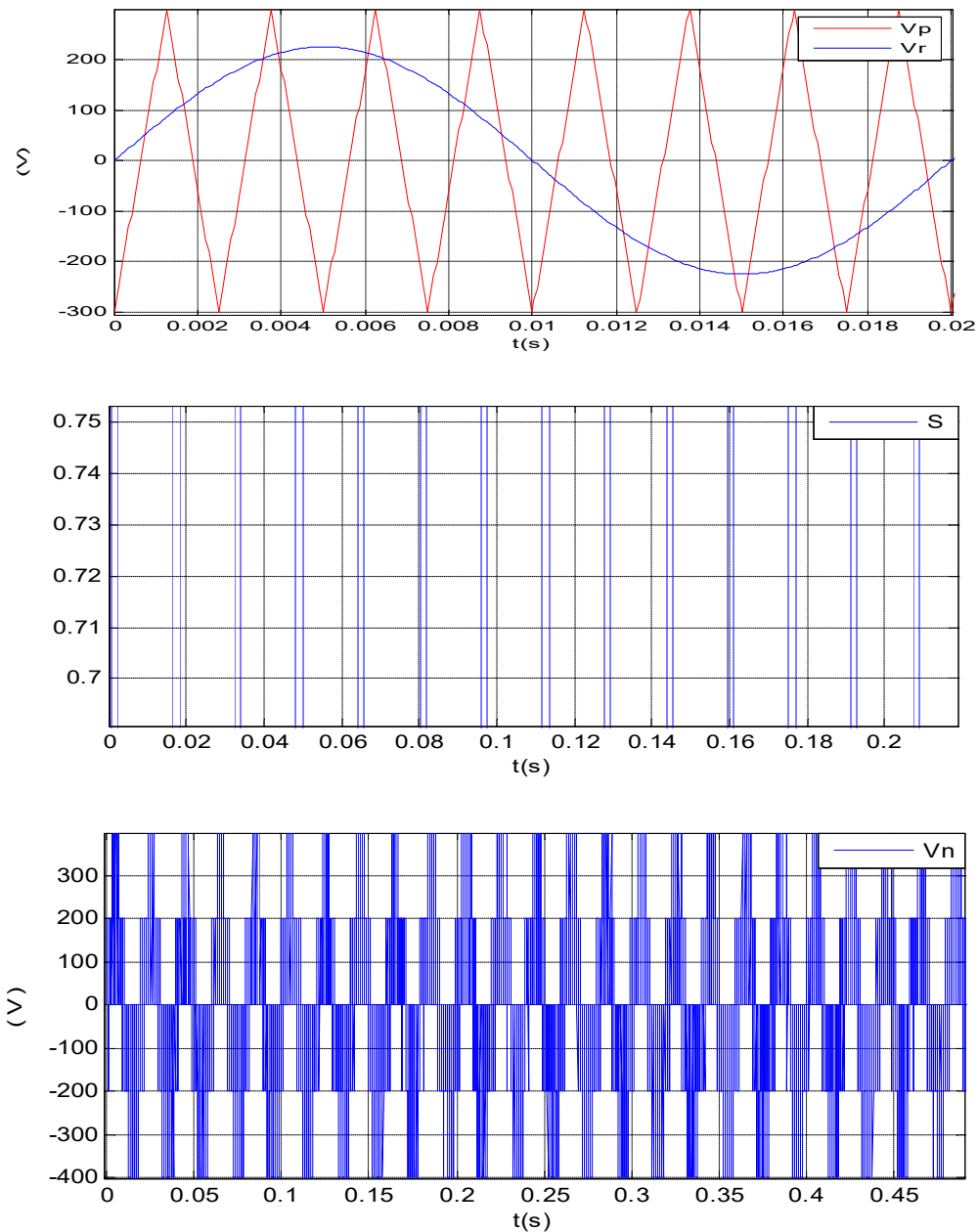


Figure 2.15. Principe de la commande MLI- intersective.

2.7. Résultats de simulation

La simulation de l'ensemble redresseur-onduleur-machine est une tâche primordiale. Le logiciel MATLAB est choisi, où la méthode d'Euler est utilisée pour résoudre le système différentiel. Le but de cette simulation est d'analyser le comportement de la machine alimentée directement par le réseau standard, et puis à travers le redresseur MLI commandé par hystérésis en courant et l'onduleur de tension commandé par modulation de la largeur

d'impulsions STPWM qui sera considéré par la suite. On applique un couple de charge à $t=1\text{sec}$ de valeur égale au couple nominal $C_r = 26\text{ Nm}$.

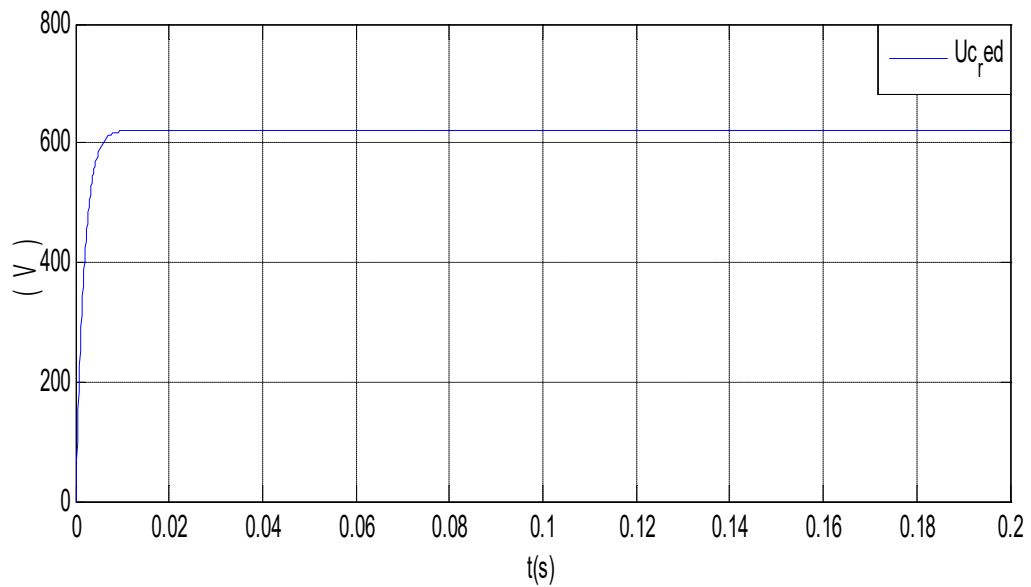


Figure 2.16. La tension du bus continu

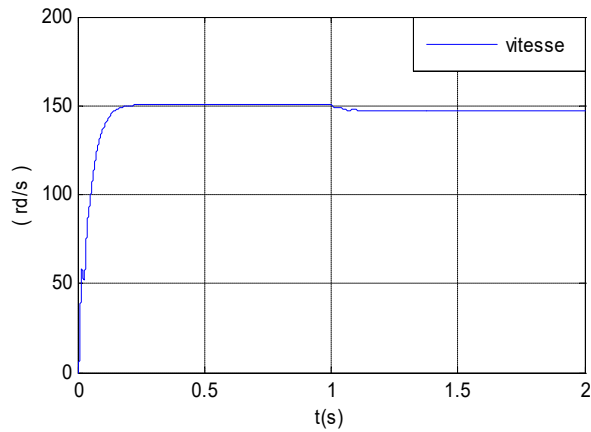


Figure 2.17. Vitesse de rotation de la MADA alimentée par le réseau

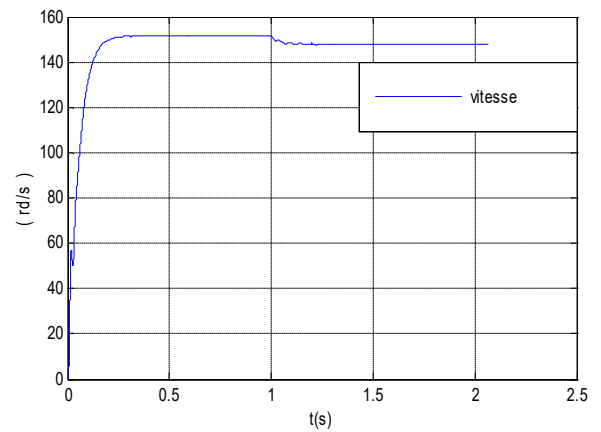


Figure 2.18. Vitesse de rotation de la MADA alimentée par la cascade

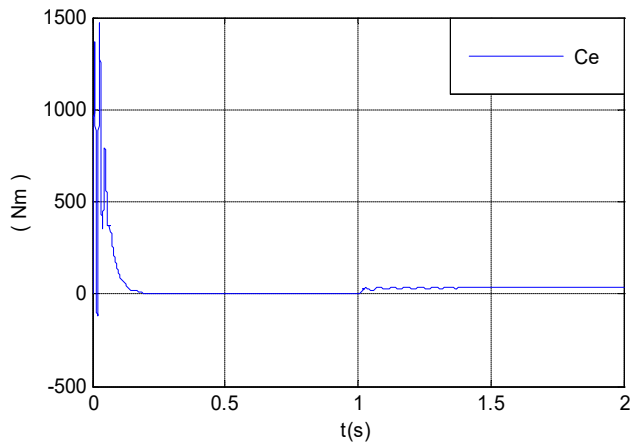


Figure 2.19. couple électromagnétique de la MADA alimentée par le **réseau**

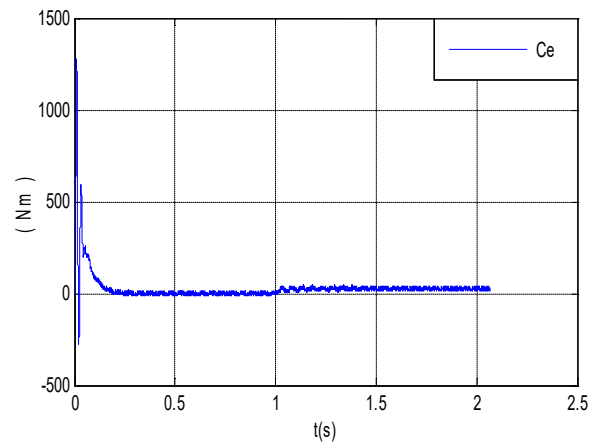


Figure 2.20. Couple électromagnétique de la MADA alimentée par la **cascade**

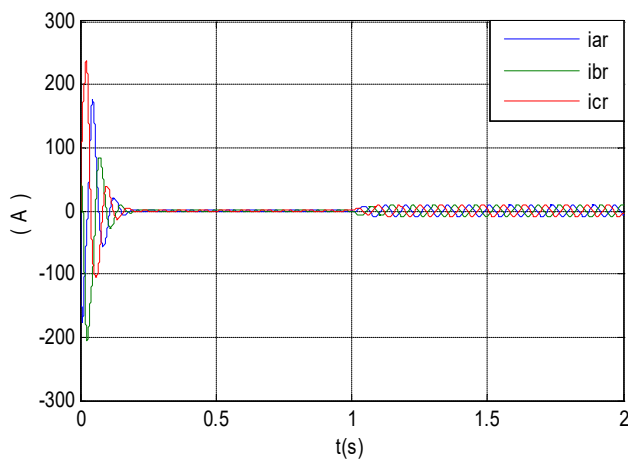


Figure 2.21. Les Courants rotoriques de la MADA alimentée par le **réseau**

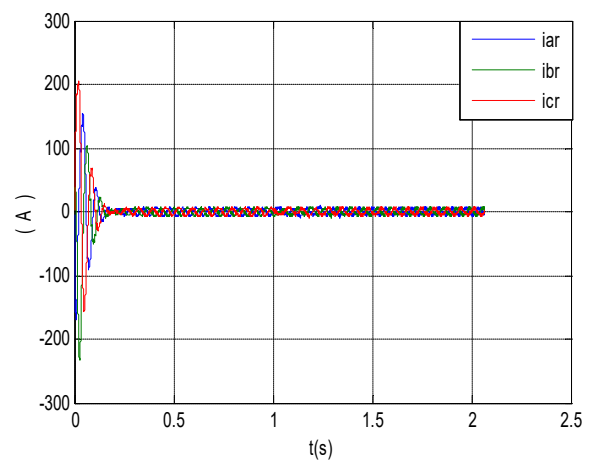


Figure 2.22. Les Courants rotoriques de MADA alimentée par la **cascade**

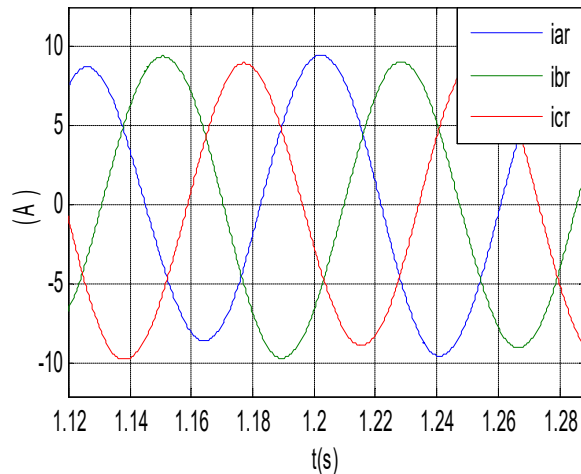


Figure 2.23. Les Courants rotoriques
MADA alimentée par le **réseau (Zoom)**

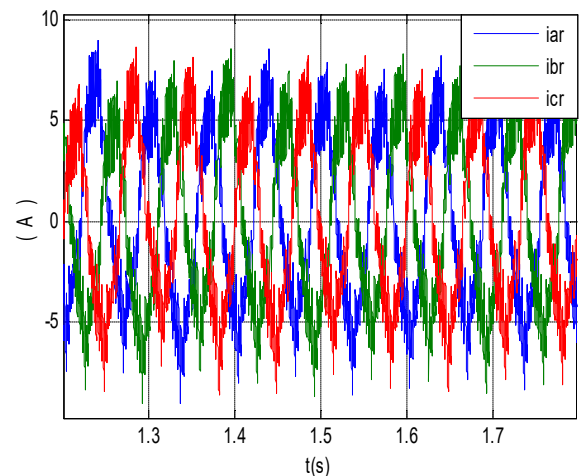


Figure 2.24. Les Courants rotoriques
MADA alimentée par la **cascade (Zoom)**

Interprétation

La montée en vitesse est quasi linéaire au début du démarrage, la vitesse atteinte est proche de 150 rad/s (vitesse de synchronisme), la machine étant à vide. Lors de l'application d'un couple de charge égale au couple nominal $C_r = C_{en} = 26 \text{ Nm}$ à $t = 1 \text{ s}$, une diminution permanente de la vitesse apparaît, ceci est dû au fait qu'il n'y pas de régulation.

On remarque que le couple électromagnétique après un régime transitoire caractérisé par quelque oscillation, se stabilise à une valeur qui compense les pertes par frottement et ventilation à vide, et le couple résistant dans le cas de l'application d'une charge. Ainsi le couple monte à 47 Nm alors que le couple nominal de la machine est de l'ordre de 26 Nm . On remarque aussi le classique appel de courant lors de la mise sous tension de la machine. Les courbes des deux simulations de la machine alimentée par le réseau et par l'onduleur de tension sont presque identiques.

Les oscillations au niveau du couple et de la vitesse sont dues essentiellement au convertisseur statique car la conversion continue-alternative fait apparaître des harmoniques au niveau des tensions de sortie et des courants qui influent directement sur la forme du couple et de la vitesse. Il y a contradiction entre la volonté de limiter les pertes dans l'onduleur et le désir de travailler à fréquence de modulation élevée pour réduire les effets indésirables des commutations sur les grandeurs de sortie.

2.8. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre l'étude d'une cascade basée sur deux convertisseurs **MLI** à deux niveaux (redresseur à deux niveaux commandés par la stratégie hystérésis et onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale) associés à la machine asynchrone à double alimentation. La modélisation et l'application du redresseur à **MLI** nous a permis la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la **MADA**.

3.1. Introduction

Dans le chapitre 3, nous allons établir un modèle mathématique qui permettra de simuler le comportement de l'éolienne dans un cadre de fonctionnement bien défini.

En suite, nous allons établir la commande vectorielle de la **MADA** en régime sain qui permettra de faire fonctionner la machine en mode génératrice.

Un système physique est un ensemble de sous systèmes qui permet de nous intéresser à chaque partie séparément afin de simplifier l'étude avant de faire une synthèse de toutes les parties constituant le système global. C'est pour cette raison que nous allons dans cette partie, commencer par modéliser le vent, puis nous allons nous intéresser à la modélisation de la turbine choisie. Nous allons également proposer une stratégie de commande de la turbine qui permettra de réguler sa vitesse de rotation. On termine notre travail par la simulation de système éolien.

3.2. Modélisation de la turbine éolienne

3.2.1. Modélisation du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien une loi utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [20].

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour:

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales
- développer et affiner la modélisation du rotor
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable
- fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par (3.1)[21].

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(w_k t) \quad (3.1)$$

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k

w_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k

i : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

3.2.2. Modèle aérodynamique

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique au niveau de la turbine éolienne puis en énergie électrique via un générateur. La puissance mécanique qui peut être extraite du vent se détermine au moyen de l'expression suivante[22] :

$$P_{trb} = C_p(\lambda, \beta) P_v \quad (3.2)$$

Où $C_p(\lambda, \beta)$ est le coefficient de puissance correspondant au rendement aérodynamique de la turbine[23]. Ce coefficient diffère pour chaque éolienne et dépend de l'angle d'inclinaison des pales β et du rapport de vitesse λ .

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

$$P_v = \frac{1}{2} S \rho V_v^3 \quad (3.3)$$

S : La surface balayée par l'éolienne.

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

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

$$P_{trb} = C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (3.4)$$

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

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

Le coefficient de vitesse réduite λ est un facteur spécifique des aérogénérateurs, il est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales $\Omega_{trb} \cdot R$ à la vitesse instantanée du vent V_v d'où :

$$\lambda = \frac{\Omega_{trb} \cdot R}{V_v} \quad (3.5)$$

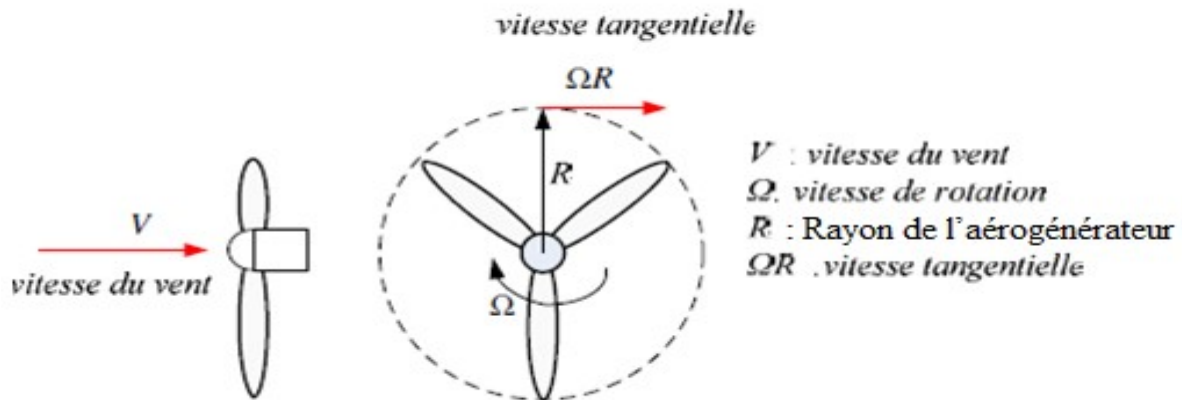


Figure 3.1. Vitesse du vent V_v et la vitesse tangentielle ($\Omega_{trb} \cdot R$).

Pour les éoliennes dont la puissance nominale et les caractéristiques sont semblables à celle utilisée dans notre étude le coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ est donné par la relation suivante[23] :

$$C_p = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (3.6)$$

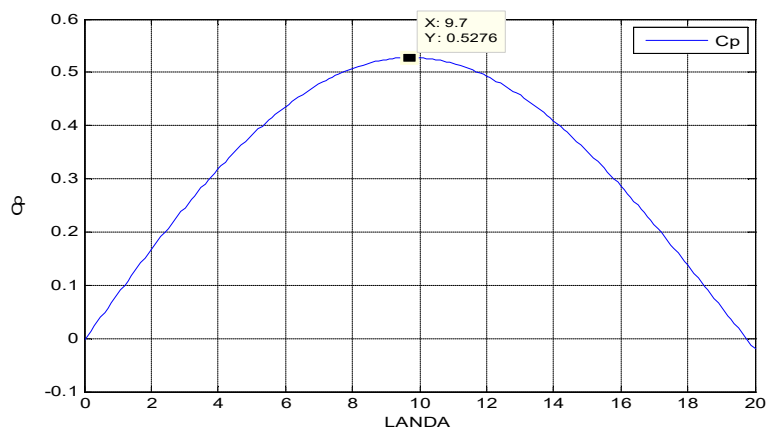


Figure 3.2. Caractéristique de la turbine éolienne.

La caractéristique de la turbine éolienne de la figure (3.2) en forme de cloche montre qu'il existe un point où l'éolienne peut être exploitée pour produire la puissance maximale. Ainsi faire fonctionner l'éolienne autour de ce point, permet de prélever la puissance maximale afin de garantir un coefficient de puissance optimal.

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

$$\begin{cases} C_p^{opt} = 0.5483 \\ \lambda^{opt} = 6.41 \end{cases} \quad (3.7)$$

3.2.4. Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_{trb} . L'axe de la turbine est couplé à un multiplicateur de gain G dont l'axe mécanique est à son tour couplé à celui du générateur électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme une seule pale et de même le système mécanique équivalent est alors caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.

De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme le montre la **Figure (3.3)** et dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, a déjà été vérifiée[23].

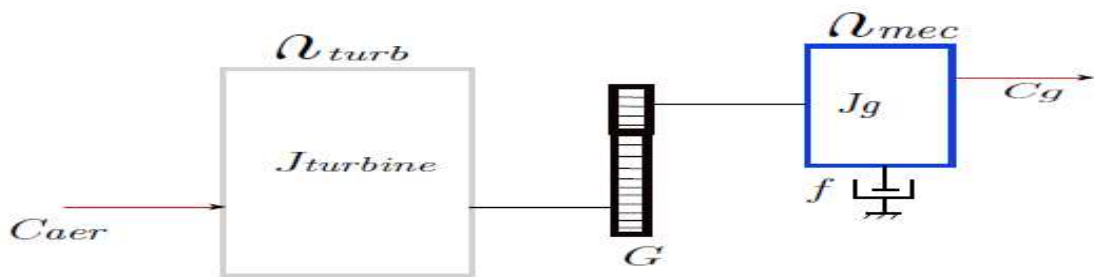


Figure 3.3. Modèle mécanique de la turbine éolienne.

Les notations utilisées sur cette figure correspondent à :

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

J_g :Moment d'inertie de la **MADA**.

f_{vis} :Coefficient dû aux frottements visqueux de la **MADA**.

C_g :Couple mécanique sur l'arbre de la **MADA**.

Ω_{mec} :Vitesse de rotation de la **MADA**.

a. Modèle du multiplicateur de vitesse

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

$$\Omega_{mec} = G. \Omega_{trb} \quad (3.8)$$

Où G représente le gain du multiplicateur.

Aussi, le couple C_g généré sur l'arbre qui entraîne la génératrice est lié au couple turbine

C_{trb} par:

$$C_g = \frac{C_{trb}}{G} \quad (3.9)$$

b. Modèle de l'arbre

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

$$J = \frac{J_{trb}}{G^2} + J_g \quad (3.10)$$

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum C_i = C_{mec} \quad (3.11)$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{vis} - C_{em} \quad (3.12)$$

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

$$C_{vis} = f_{vis} \cdot \Omega_{mec} \quad (3.13)$$

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

$$C_g - C_{em} = \left(\frac{J_{trb}}{G^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f_{vis} \cdot \Omega_{mec} \quad (3.14)$$

La figure (3.4) montre le schéma bloc du modèle de la turbine.

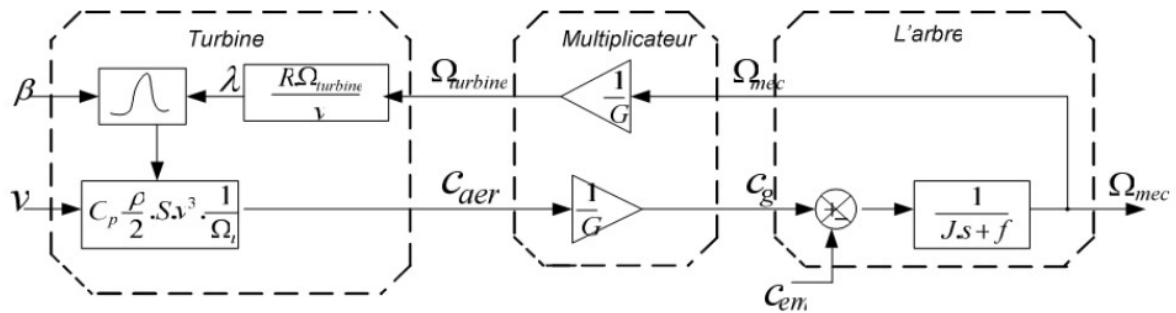


Figure 3.4. Le schéma bloc du modèle de la turbine

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

Les entrées de la turbine sont :

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

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur équation (3.8), (3.9).

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

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

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

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

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

3.3. Stratégie de commande de la turbine éolienne

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

Il y a quatre zones de fonctionnement pour une éolienne [24] :

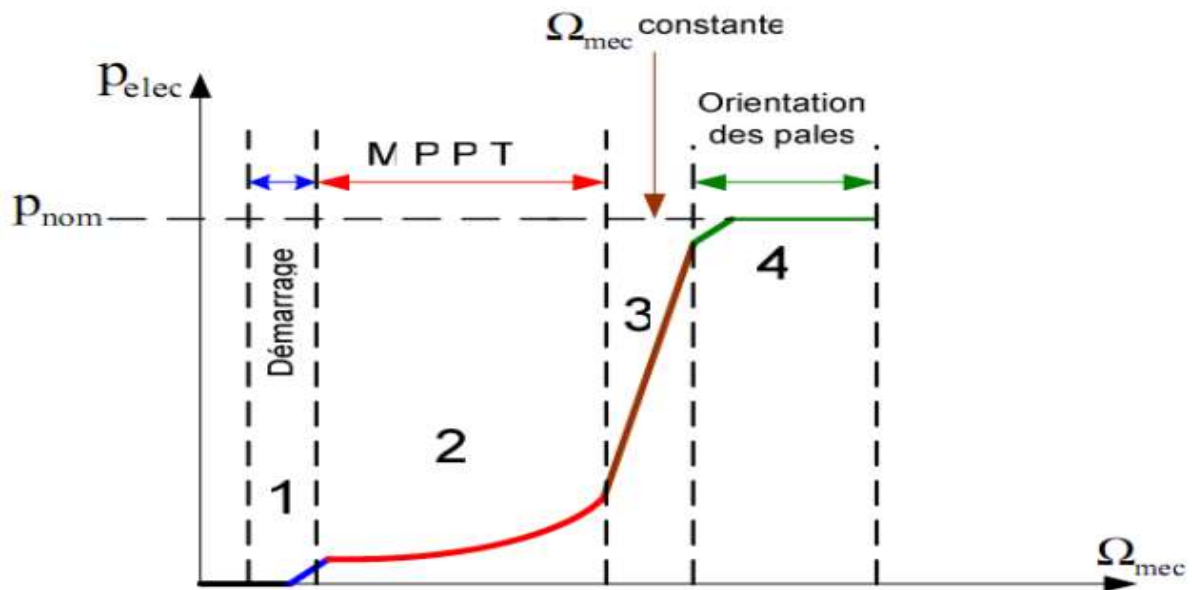


Figure 3.5. Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.

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

Zone2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale **MPPT** (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un **Cp** maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

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

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

3.3.2. Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de cloche. Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale de ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la **Figure (3.6)** illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent V_v donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation:

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \rho S V_v^3$$

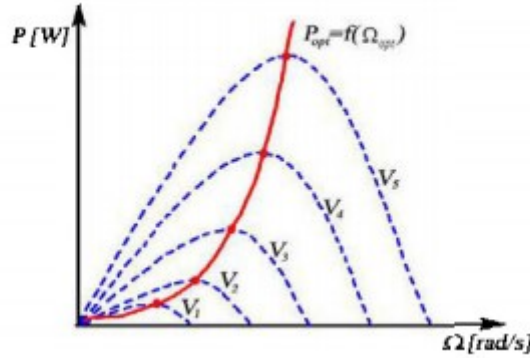


Figure 3.6. Caractéristique de l'éolienne dans le plan, vitesse de rotation. [25].

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie: Maximum Power Point Tracking (**MPPT**) correspond à la zone II doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches possibles :

- La première approche, la moins classique, ne considère que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ n'est pas connue.
- La deuxième approche considère que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales [25].

a. MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne

Cette façon de procéder exige du constructeur de l'éolienne des essais de caractérisation (soufflerie) ou des simulations du profil des pales. Une telle caractérisation permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale et d'utiliser des convertisseurs plus basiques et moins coûteux. Deux familles de structures de commande sont présentées dans cette approche[26].

b. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

La nature du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quel que soit la puissance générée.

$$C_{em} = C_{em_{ref}} \quad (3.15)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de la vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence[25].

$$C_{em_{ref}} = K_{ass} (\Omega_{mec_{ref}} - \Omega_{mec}) \quad (3.16)$$

K_{ass} : Régulateur de vitesse.

$\Omega_{mec_{ref}}$: La vitesse mécanique de référence.

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

$$\Omega_{mec_{ref}} = G \Omega_{trb-ref} \quad (3.17)$$

Selon l'équation, la vitesse de rotation de la turbine est égale à:

$$\Omega_{trb} = \frac{V_v \lambda}{R} \quad (3.18)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{opt} et le coefficient de puissance maximale $C_{p_{max}}$ peut se déduire de l'équation (3.19):

$$\Omega_{trb_{ref}} = \frac{V_v \lambda_{opt}}{R} \quad (3.19)$$

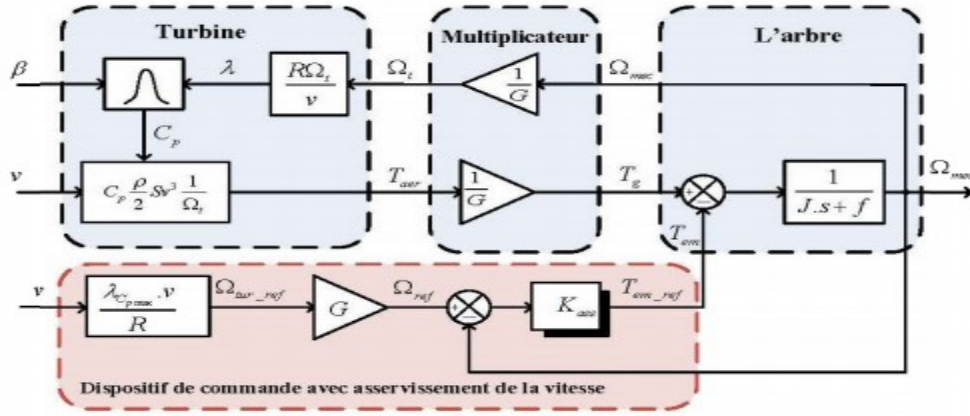


Figure 3.7. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

c. Calcul des paramètres du régulateur de vitesse PI

Considérons le schéma de commande donné par la Figure(3.7) Le couple électromagnétique de référence est obtenu grâce à l'action d'un contrôleur de type **PI** sur la différence entre la vitesse de référence et la vitesse de rotation.

La fonction de transfert qui décrit cette action est donnée par :

$$C_{em-ref}(s) = \left(k_i + \frac{k_p}{s}\right) (C_{trb-ref}(s) - C_{mec}(s)) \quad (3.20)$$

k_i : Le gain intégral

k_p : Le gain proportionnel

Si on isole la partie du schéma de commande qui concerne la boucle de régulation de la vitesse on obtient le schéma de la Figure (3.8)[27].

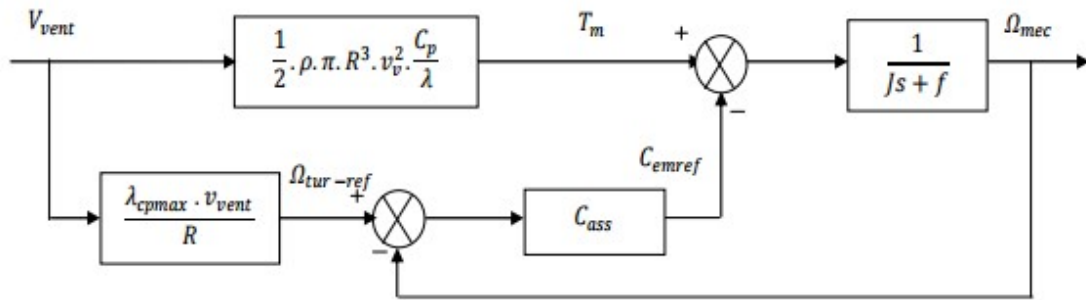


Figure 3.8. Schéma bloc de l'asservissement en utilisant un régulateur PI.

Comme le système à étudier est linéaire on peut écrire en utilisant le théorème de superposition, la fonction de transfert sous la forme suivante:

$$\Omega_{mec}(s) = F(s) \cdot \Omega_{mec-ref}(s) - P(s) \cdot T_m(s) \quad (3.21)$$

$$F(s) = \frac{k_p s + k_i}{js^2 + (f_{vis} + k_p)s + k_i} \quad (3.22)$$

$$P(s) = \frac{s}{js^2 + (f_{vis} + k_p)s + k_i} \quad (3.23)$$

Au régime permanent l'erreur statique due à la perturbation externe en l'occurrence le couple aérodynamique T_m est nulle grâce à la fonction intégrale du régulateur.

La fonction de transfert s'écrira alors comme ceci:

$$\Omega_{mec}(s) = F(s) \cdot \Omega_{mec_ref}(s) \quad (3.24)$$

Le choix d'une pulsation propre ω_n et d'un facteur d'amortissement ξ_n permettent de calculer les coefficients du régulateur **PI**.

$$k_i = \omega_n^2 \cdot J \quad (3.25)$$

$$k_p = 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \cdot J - f_{vis} \quad (3.26)$$

3.4. Commande vectorielle par la puissance active et réactive

3.4.1. Principe de la commande vectorielle

La commande par orientation de flux proposé par **Blaschke**, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones.

L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, I_{dr} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant I_{qr} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes I_{dr} et I_{qr} sont mutuellement découplées.

De nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.

- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

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

a. Choix du référentiel pour le modèle déphasé

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

Nous pouvons écrire :

$$\phi_{ds} = \phi_s, \phi_{qs} = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + w_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (w_s - w) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (w_s - w) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad (3.27)$$

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

$$V_{ns} = R_s \cdot i_{ns} + \frac{d}{dt} \phi_{ns} \quad (3.28)$$

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

$$V_{ns} = \frac{d}{dt} \phi_{ns} \quad (3.29)$$

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

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

$$V_{ds} = 0, V_{qs} = V_s \quad (3.30)$$

Le principe d'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la Figure (3.9)

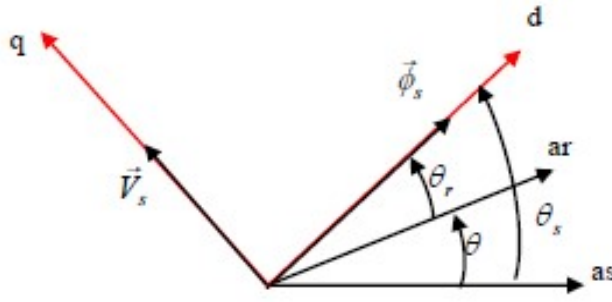


Figure 3.9. Orientation du flux statorique

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

$$C_e = n_p \frac{M}{L_s} \phi_{ds} \cdot I_{qr} \quad (3.31)$$

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

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \phi_{ds} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (3.32)$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (3.33)$$

A partir des équations (3.33), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (3.34)$$

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

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (3.35)$$

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

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot i_{ds} \end{cases} \quad (3.36)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (3.34) dans l'équation(3.36), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances actives et réactives:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (3.37)$$

En tirant ($\phi_s = V_s / \omega_s$) de l'équation (3.32), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} i_{dr} \quad (3.38)$$

Ces équations montrent qu'on a un découplage entre les commandes des puissances où la puissance active peut être commandée par la composante en quadrature du courant i_{qr} . La puissance réactive peut être commandée par la composante directe du courant i_{dr} .

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

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (3.39)$$

Les équations des flux

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (3.40)$$

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

$$\begin{cases} \phi_s = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \phi_s = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (3.41)$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \cdot \omega_s \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (3.42)$$

V_{dr} et V_{qr} : sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

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

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite.

En examinant les équations (3.37) et (3.36), on peut établir le schéma bloc de la Figure (3.10) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine :

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances

actives et réactives. Cette méthode sera appelée *méthode directe* car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

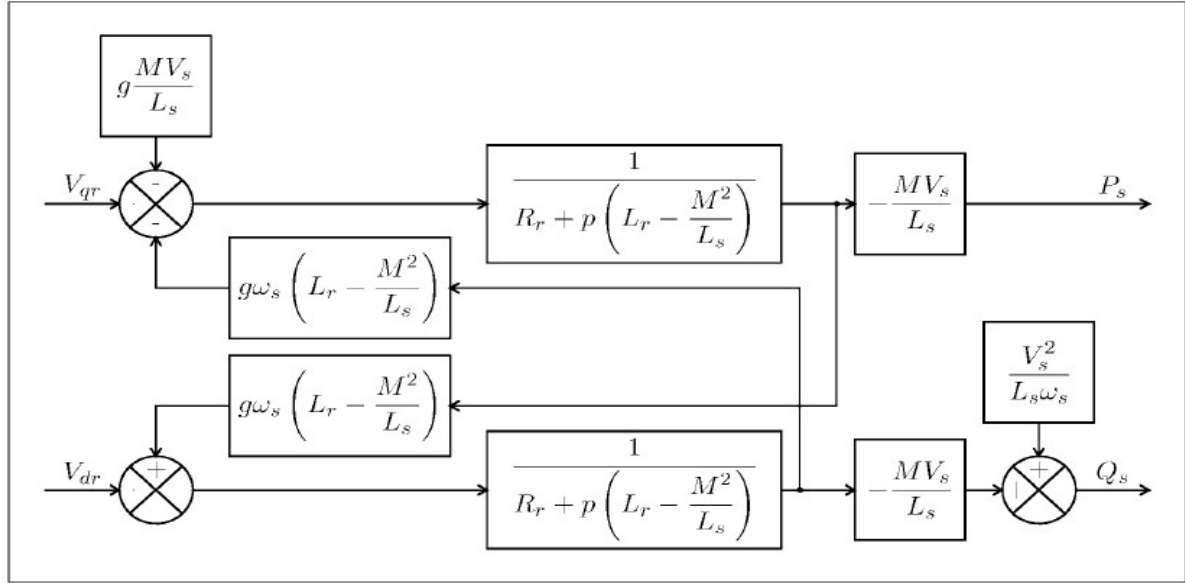


Figure 3.10. Schéma bloc de la MADA.

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

b. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

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

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (3.43)$$

Avec :

$$\begin{cases} C_{em} = p \frac{M}{L_r} \Phi_{ds} i_{qr} \\ \frac{J}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \end{cases}$$

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

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \Phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} + g \cdot w_s \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{ds} - \beta \cdot w \Phi_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - g \cdot w_s \cdot i_{dr} + \beta \cdot w \Phi_{ds} - \beta V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{qr} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{p\mu}{J} \Phi_{ds} i_{qr} - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} w \end{cases} \quad (3.44)$$

Avec :

$$\begin{cases} \alpha_s = \frac{R_s}{L_s} \\ \sigma_r = L_r \cdot \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \\ \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{L_s^2 \sigma_r} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \beta = \frac{M}{L_s \sigma_r} \\ \mu = \frac{3M}{2L_s} \end{cases}$$

3.4.2. Commande directe

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

3.4.3. Mise en place de la régulation

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la Figure (3.10) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{V_s \cdot M}{L_s}$.

Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas de régulateur entre les courants rotoriques et les puissances. Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure (3.10).

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la Figure (3.11).

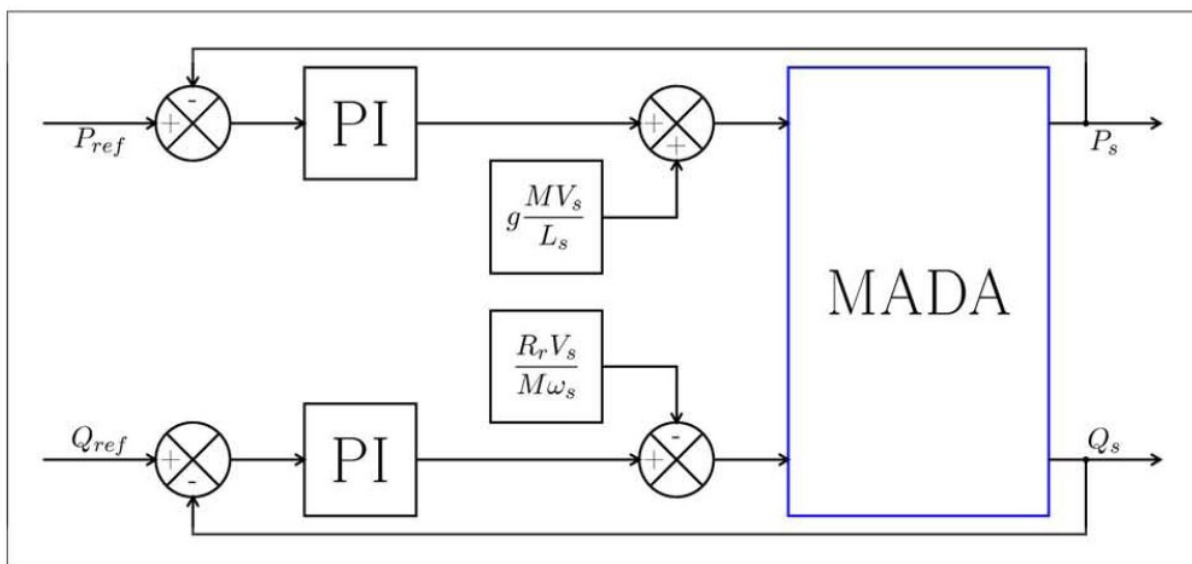


Figure 3.11. Schéma bloc de la commande directe

a. Synthèse du régulateur PI

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

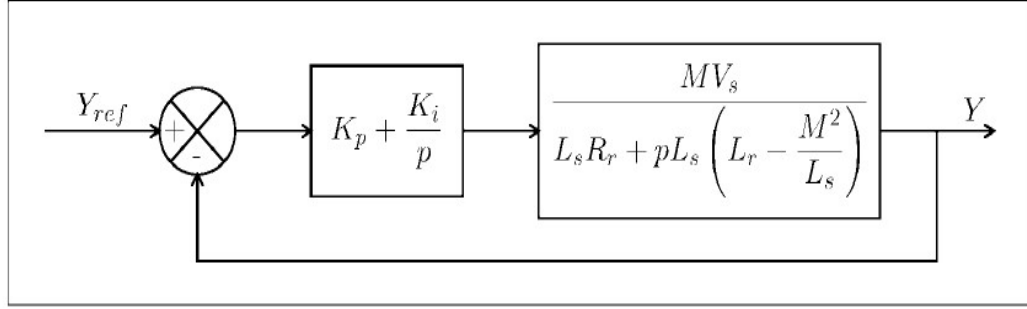


Figure 3.12. Système régulé par un PI

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (3.45)$$

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

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (3.46)$$

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

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (3.47)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \text{ avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (3.48)$$

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

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s R_r}{M V_s} \quad (3.49)$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse de régulateur PI.

La figure (3.13) représente la structure globale d'une chaîne de conversion d'énergie

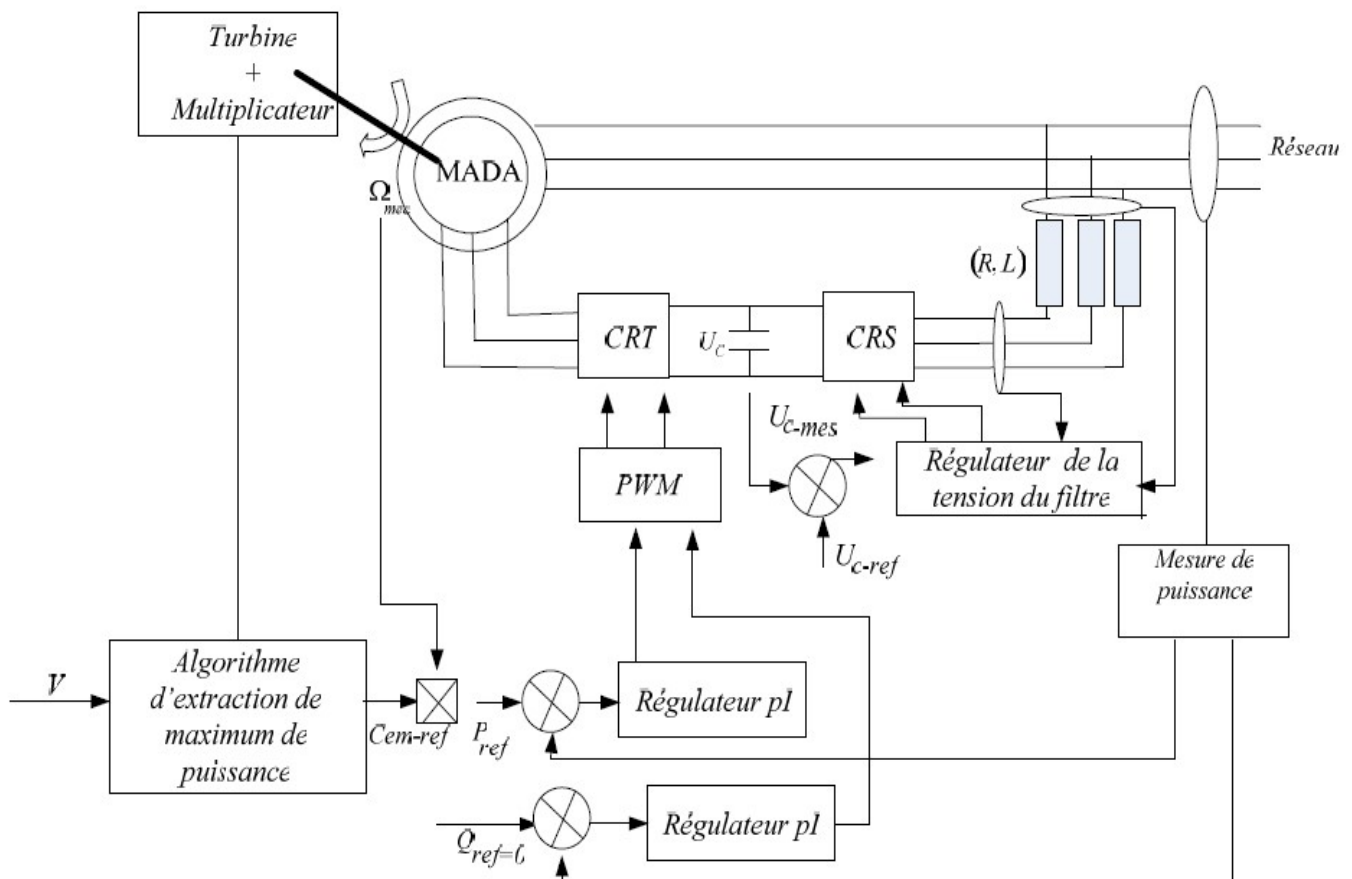


Figure 3.13. Schéma structurel du système éolien global

3.5. Résultats de simulation

Le test de performance de la chaîne éolienne est fait en considérant un vent de vitesse variable. La machine étant raccordée à un réseau de grande puissance d'une tension nominale efficace de 400 V et d'une fréquence de 50 Hz. Les résultats de simulation de toute la chaîne éolienne sont représentés sur les figures ci-dessous.

Nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles telles que les courants statoriques et rotoriques, la puissance active et réactive statorique de la MADA en régime sain.

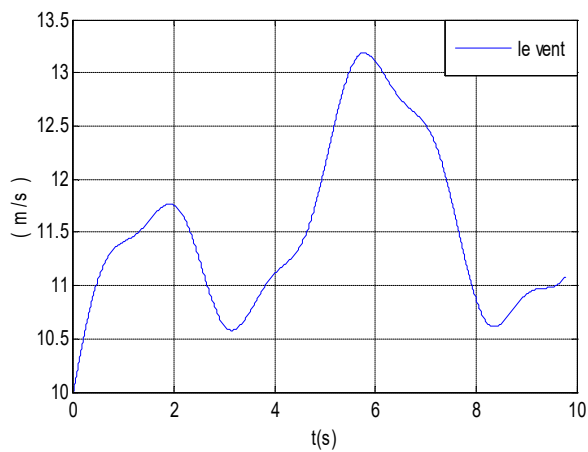


Figure 3.14.Le profil du vent

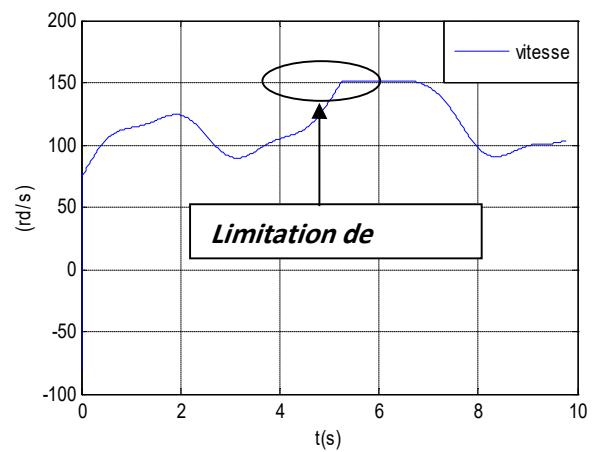


Figure 3.15.La vitesse de rotation

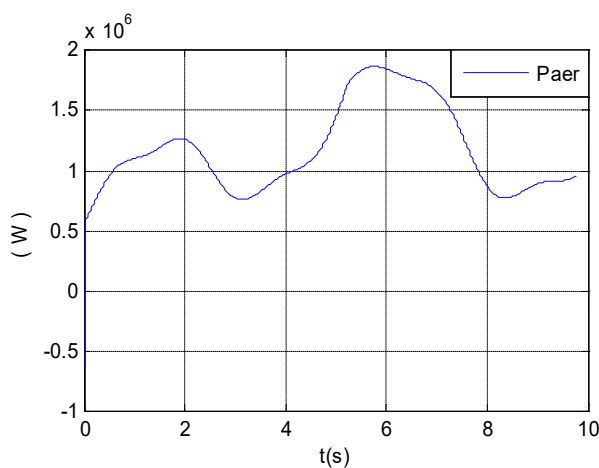


Figure 3.16.La puissance aérodynamique

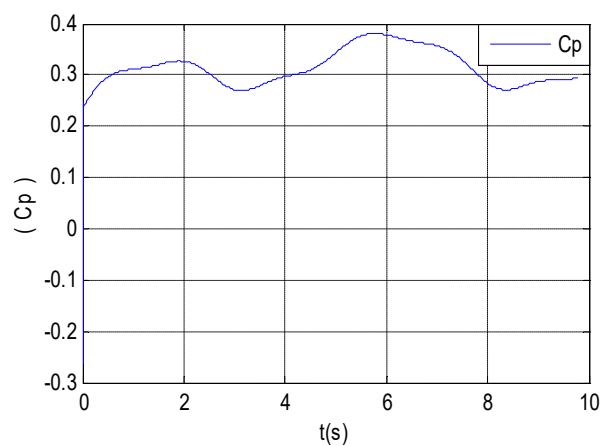


Figure 3.17.Le facteur de puissance

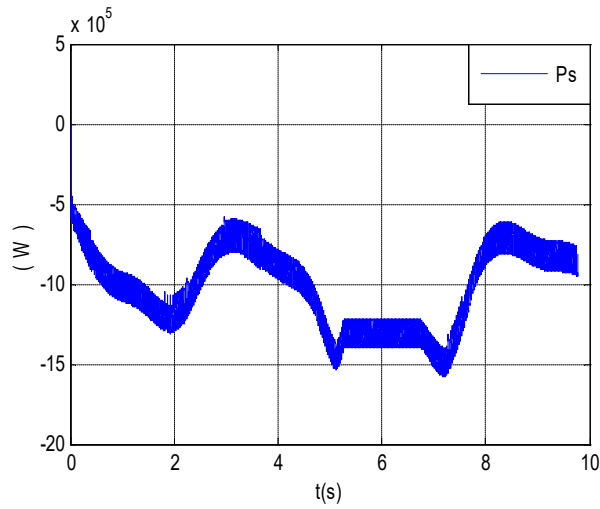


Figure 3.18. La puissance active statorique

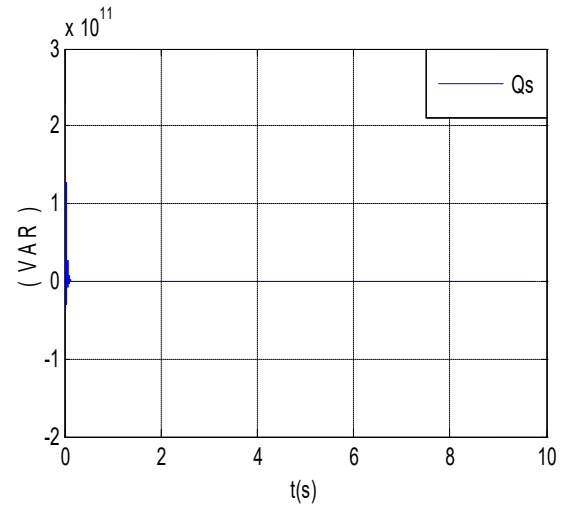


Figure 3.19. La puissance réactive statorique

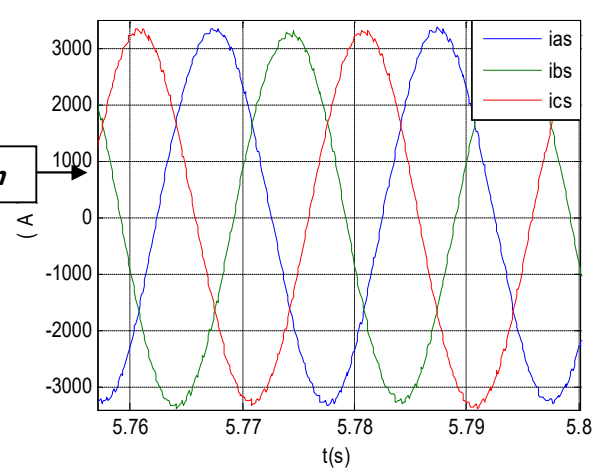
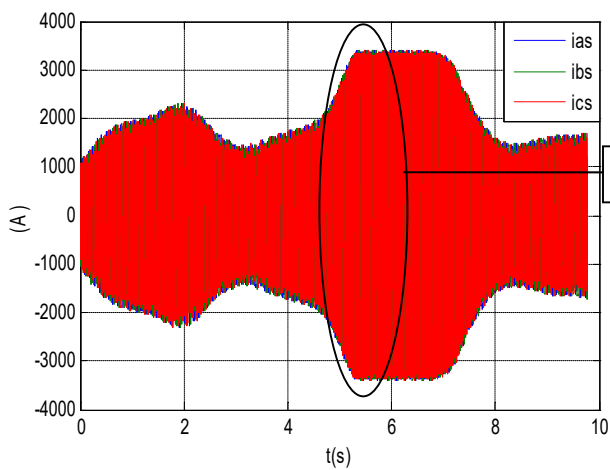


Figure 3.20. Courants statorique

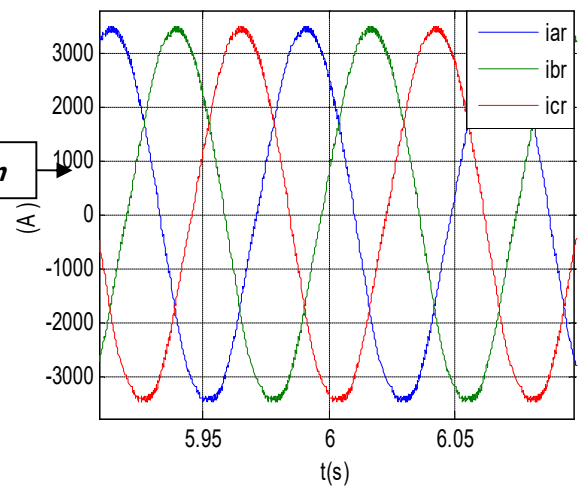
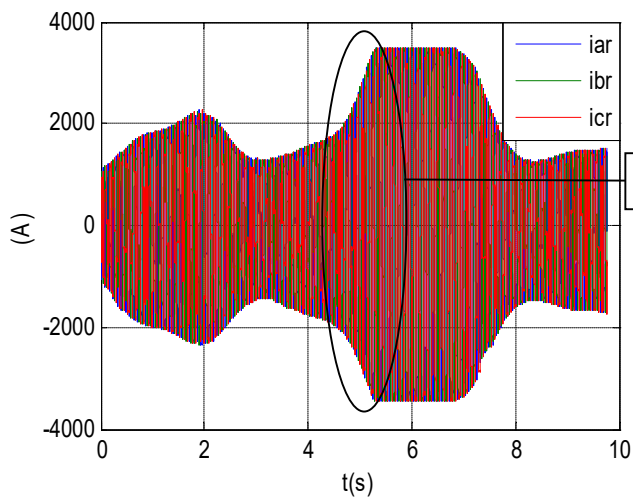


Figure 3.21.courants rotorique

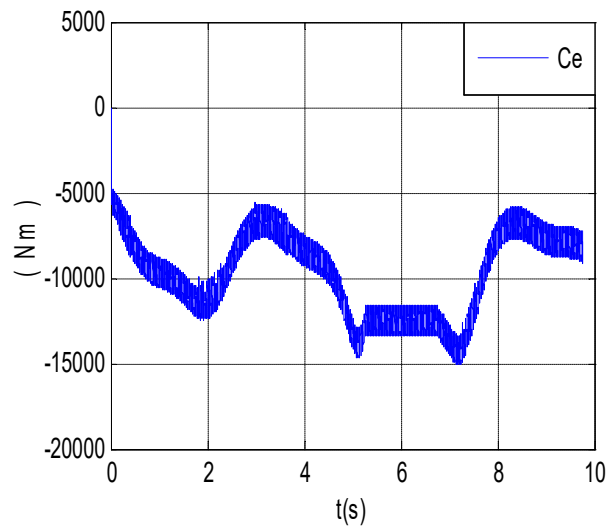


Figure 3.22.Couple électromagnétique

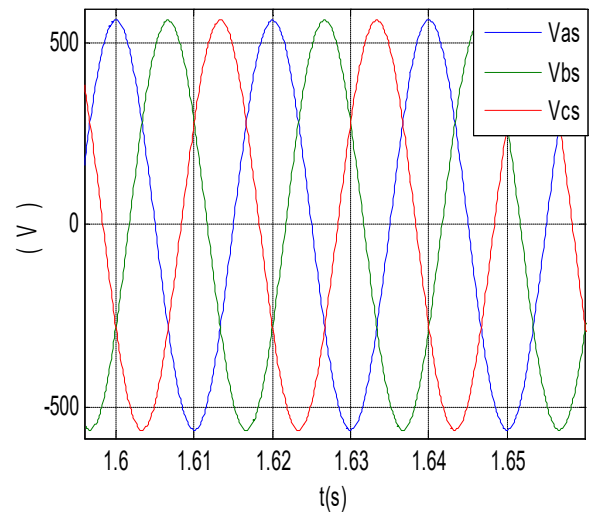


Figure 3.23.tensions statorique

Interprétation

La Figure (3.14) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne sa valeur moyenne est autour de (10m/s).

Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique figure (3.18) est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice figure (3.15), et cette dernière est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite. La Figure (3.18) montre que La puissance active statorique est négative signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA et la puissance réactive est nulle, c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire. Le couple électromagnétique de la génératrice varie selon celui de la turbine qui est l'image de la vitesse du vent.

La Figure (3.20) et Figure (3.21) présente la variation de l'amplitude du courant statorique et rotorique en fonction de la vitesse de rotation, finalement on en déduit que toutes les grandeurs électromécaniques prennent une forme du profil du vent.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé la turbine en premier temps et on a développé un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en parlant de la commande vectorielle directe de la MADA. Ensuite, On a présenté les résultats de simulation d'une chaîne de conversion d'énergie pour le régime de fonctionnement sain.

4.1. Introduction

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation a fait l'objet de nombreux travaux, que ce soit dans le but du dimensionnement, de la commande ou du diagnostic. La simulation est l'outil privilégié pour évaluer les performances et le comportement des systèmes sous des conditions extrêmes ou en mode de défaillance. Il faut noter que la simulation ne peut exister sans modélisation. En effet, la simulation n'est autre que la mise en application d'un modèle bien déterminé. En outre, l'un des objectifs les plus importants dans le cadre du diagnostic est la mise en point du modèle de simulation le plus fiable possible, représentant le fonctionnement défaillant de la machine. L'étape de modélisation s'avère donc indispensable pour la caractérisation et la maîtrise des phénomènes qui peuvent y apparaître.

L'un des défauts les plus communs dans les machines électriques y compris bien sûr la MADA est le défaut de court-circuit entre-spires qui est causé par de nombreuses raisons comme le bruit mécaniques, dégradation de l'isolant du bobinage qui peut conduire à un amorçage, un contact entre spires et les surtensions transitoires. Ce défaut peut se produire dans une phase ou parfois plusieurs phases simultanément. Dans ce chapitre, deux modèles mathématiques seront développés, l'un pour un défaut de court-circuit apparaissant dans une seule phase (statorique) et l'autre dans plusieurs phases (statoriques et/ou rotoriques). La stratégie de modélisation est de considérer les parties court-circuitées comme certains circuits supplémentaires placés en parallèle aux circuits d'enroulement d'origine du MADA, puis représenter les relations électriques et magnétiques entre tous ces circuits à l'aide de la théorie du circuit.

4.2. Modélisation de la MADA avec défaut statorique « court-circuit entre spires »

Le type de court-circuit statorique le plus fréquent et qu'on va traiter dans cette partie concerne le court-circuit entre spires de même phase. Pour modéliser ce défaut, on va supposer qu'un nombre de spires « n » parmi celles la phase « a » est court-circuité. Cette section de spires court-circuitées est définie par le rapport « cc » entre le nombre de spires court-circuitées et le nombre total des spires de la phase « a », qu'on introduit dans le

modèle mathématique régissant le fonctionnement de la machine. La **Figure (4.1)** présente les 3 enroulements statorique avec court circuit.

Par conséquent l'inductance propre et la résistance de la phase en défaut change ainsi que l'inductance mutuelle entre cette phase et tous les autres enroulements de la machine.

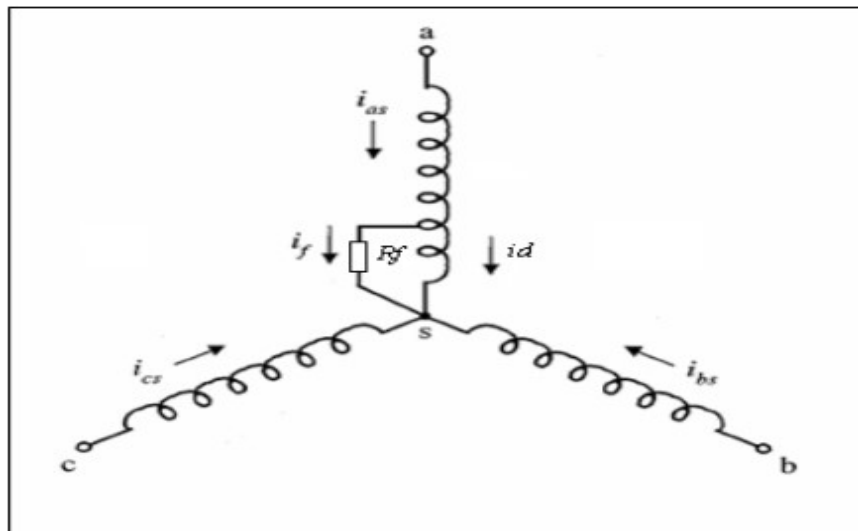


Figure 4.1. Représentation des trois enroulements statoriques d'une **MADA** avec court-circuit entre spires dans la phase 'a'.

Le défaut de court-circuit dans l'enroulement statorique entraîne une circulation d'un courant élevé dans les spires court-circuitées. Ce courant de défaut peut influencer sur les courants des autres phases et produire un court-circuit phase-terre et phase-phase, et par la suite conduire à l'endommagement de la machine.

Donc, la détection de ces défauts est indispensable pour éviter un fonctionnement dans des conditions dangereuses et réduire le temps d'arrêt.

La modélisation de la machine avec défaut de court-circuit entre spires est la première étape de développement des techniques de détection de ce défaut. Elle présente un compromis entre la complexité et la fiabilité des résultats. La modélisation de la **MADA** avec défaut consiste à introduire une résistance « R_f » en parallèle avec les spires court-circuitées dans la phase infectée **Figure 4.1**.

Une tension sera induite dans cette maille de court-circuit, cette tension induite fait circuler un courant dans les spires court-circuitées appelé courant de défaut ; ce dernier a une relation de proportionnalité avec la résistance de défaut et la tension induite. La résistance « R_f » élevée correspond au cas de début de la détérioration de l'isolation [43].

Il convient de rappeler ici que cette méthode d'analyse est uniquement destinée à des situations où la dégradation de l'isolation se passe par une longue période de temps. La nouvelle forme des équations des tensions statoriques se réécrit alors comme suit :

$$[V_{s,abc}] = [R_s] \cdot [I_{s,abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{s,abc}] \quad (4.1)$$

$$[V_{s,abc}] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} ; [I_{s,abc}] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} ; [\Phi_{s,abc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances statoriques se réécrit comme suit:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} (1 - CC_s) \cdot R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Avec : $CC_s \% = \frac{N_{cc}}{N_s}$

N_{cc} : Nombre total de spires court-circuitées.

N_s : Nombre de spires statorique totales par phase.

$CC_s \%$: Le pourcentage des spires statorique court-circuitées (le degré de défaut).

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

$$[L_{ss}] = L_s \text{diag}[(1 - CC_s) \ 1 \ 1] + M_s \begin{bmatrix} (1 - CC_s)^2 & -\frac{(1 - CC_s)}{2} & -\frac{(1 - CC_s)}{2} \\ -\frac{(1 - CC_s)}{2} & 1 & \frac{-1}{2} \\ -\frac{(1 - CC_s)}{2} & \frac{-1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Par conséquent, la matrice des inductances mutuelles (4.3) devient:

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} (1 - CC_s). \cos \theta & (1 - CC_s). \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & (1 - CC_s). \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

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

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} M_r + l_r & -\frac{M_r}{2} & -\frac{M_r}{2} \\ -\frac{M_r}{2} & M_r + l_r & -\frac{M_r}{2} \\ -\frac{M_r}{2} & -\frac{M_r}{2} & M_r + l_r \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

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

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

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

$$[V_{r,abc}] = [R_r] \cdot [I_{r,abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{r,abc}] \quad (4.5)$$

$$[V_{r,abc}] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; [I_{r,abc}] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_{r,abc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances rotoriques se réécrit comme suit:

$$[R_r] = \begin{bmatrix} (1 - CC_r). R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\text{Avec : } CC_r \% = \frac{N_{cc}}{N_r}$$

N_{cc} : Nombre total de spires court-circuitées.

N_r : Nombre de spires rotorique totales par phase.

$cc_r\%$: Le pourcentage des spires rotorique court-circuitées (le degré de défaut).

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

$$[L_{rr}] = L_r \text{diag}[(1 - CC_r) \ 1 \ 1] + M_r \begin{bmatrix} (1 - CC_r)^2 & -\frac{(1-CC_r)}{2} & -\frac{(1-CC_r)}{2} \\ -\frac{(1-CC_r)}{2} & 1 & \frac{-1}{2} \\ -\frac{(1-CC_r)}{2} & \frac{-1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Par conséquent, la matrice des inductances mutuelles devient :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} (1 - CC_r). \cos \theta & (1 - CC_r). \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & (1 - CC_r). \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

La matrice des inductances statorique et La matrice des résistances statorique demeure égale à celle du cas non défaillant :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} M_s + l_s & -\frac{M_s}{2} & -\frac{M_s}{2} \\ -\frac{M_s}{2} & M_s + l_s & -\frac{M_s}{2} \\ -\frac{M_s}{2} & -\frac{M_s}{2} & M_s + l_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

4.4. Modélisation de la MADA avec défaut statorique et rotorique «court-circuit entre spires»

La modélisation de la MADA avec défaut de court-circuit entre spires statorique et rotoriques en suivant les mêmes étapes précédente. La nouvelle forme des équations des tensions statoriques et rotoriques se réécrit alors comme suit [28] :

$$[V_{s,abc}] = [R_s] \cdot [I_{s,abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{s,abc}] \quad (4.9)$$

Avec :

$$[V_{s,abc}] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} ; [I_{s,abc}] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} ; [\Phi_{s,abc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances statoriques se réécrit comme suit:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} (1 - CC_s) \cdot R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$[V_{r,abc}] = [R_r] \cdot [I_{r,abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{r,abc}] \quad (4.11)$$

Avec :

$$[V_{r,abc}] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} ; [I_{r,abc}] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} ; [\Phi_{r,abc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances rotoriques se réécrit comme suit:

$$[R_r] = \begin{bmatrix} (1 - CC_r) \cdot R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Nous aurons les nouvelles matrices des inductances statoriques et rotoriques suivantes:

$$[L_{ss}] = L_s \text{diag}[(1 - CC_s) \ 1 \ 1] + M_s \begin{bmatrix} (1 - CC_s)^2 & -\frac{(1 - CC_s)}{2} & -\frac{(1 - CC_s)}{2} \\ -\frac{(1 - CC_s)}{2} & 1 & \frac{-1}{2} \\ -\frac{(1 - CC_s)}{2} & \frac{-1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$[L_{rr}] = L_r \text{diag}[(1 - CC_r) \ 1 \ 1] + M_r \begin{bmatrix} (1 - CC_r)^2 & -\frac{(1 - CC_r)}{2} & -\frac{(1 - CC_r)}{2} \\ -\frac{(1 - CC_r)}{2} & 1 & \frac{-1}{2} \\ -\frac{(1 - CC_r)}{2} & \frac{-1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Par conséquent, la matrice des inductances mutuelles devient:

$$[L_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} (1 - CC_s). (1 - CC_r). \cos \theta & (1 - CC_s). (1 - CC_r). \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & (1 - CC_s). (1 - CC_r). \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

(4.15)

4.5. Résultats de simulation :

4.5.1. Simulation pour un fonctionnement en court-circuit satorique de la MADA en modèle réel (abc)

Pour décrire le comportement dynamique de la MADA avec défaut de courts circuits entre spires satorique dans la phase (a), on simule au démarrage à vide et on applique un couple résistant égal au couple nominal $C_r = C_{em}$ l'instant $t = 2$ s et on applique un défaut de 10% à l'instant $t=2.5$ s, un deuxième défaut 15% à l'instant $t=3$ s et à la fin on applique un défaut de 20% à l'instant $t=3.5$ s.

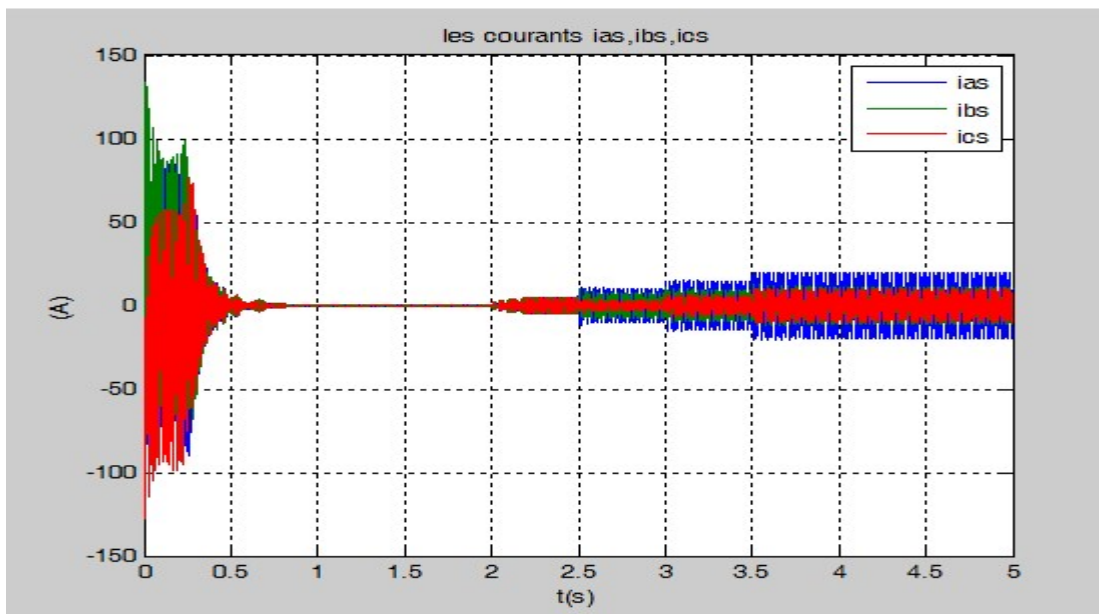


Figure 4.2. Les courants satoriques de la MADA avec défaut satorique dans la phase (a).

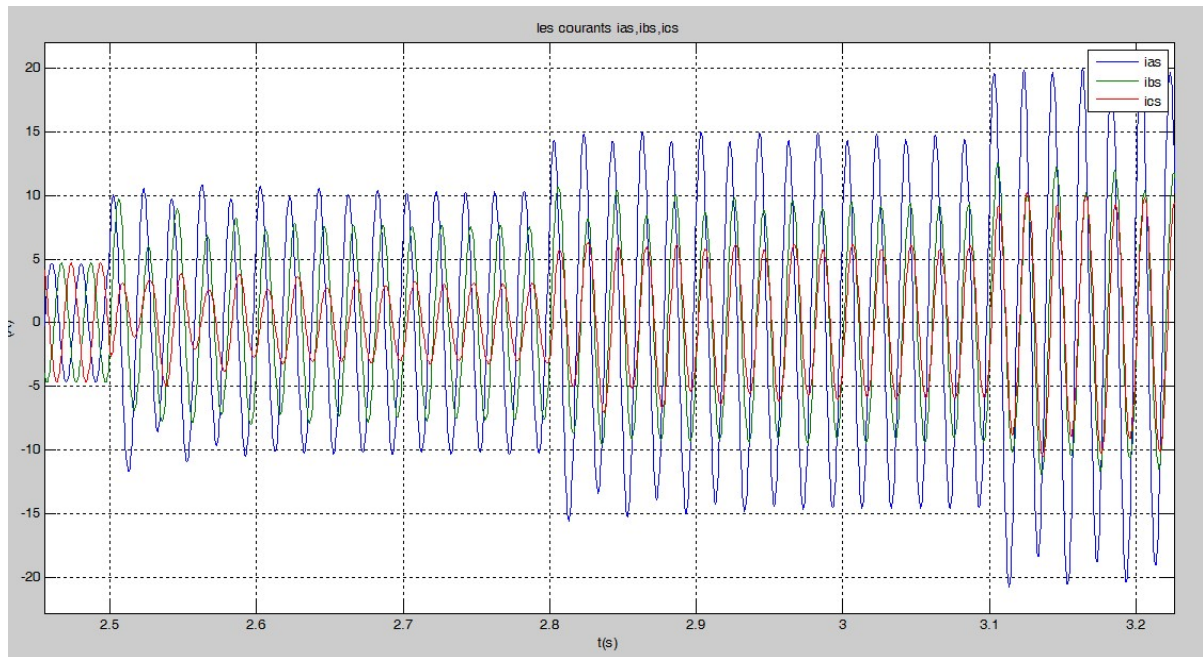


Figure 4.3. Zoom des courants statoriques de la MADA avec défaut statorique dans la phase(a).

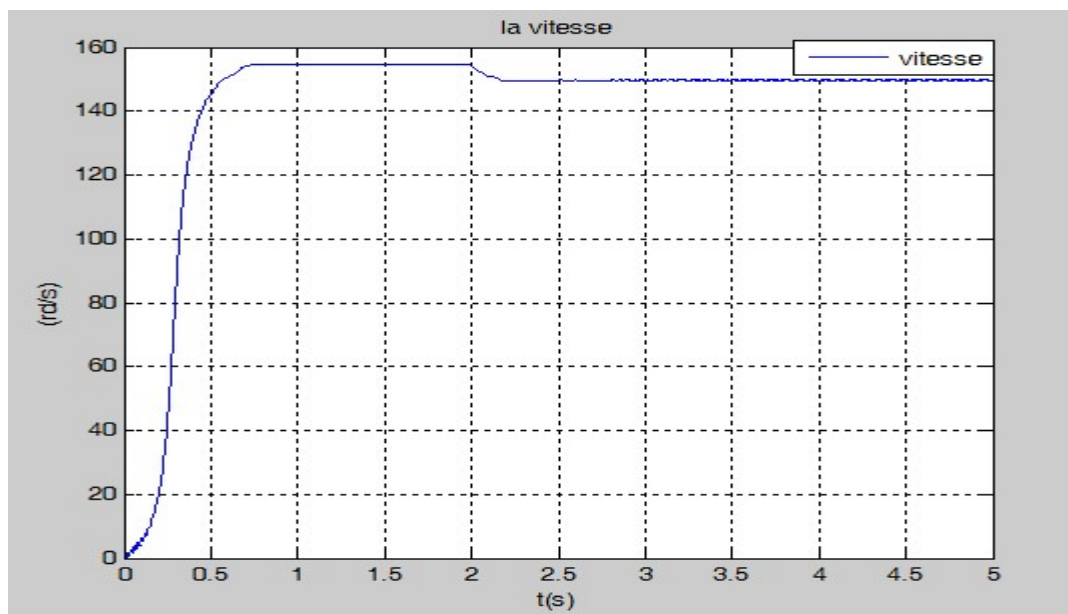


Figure 4.4. vitesse de la **MADA** avec défaut statorique dans la phase (a).

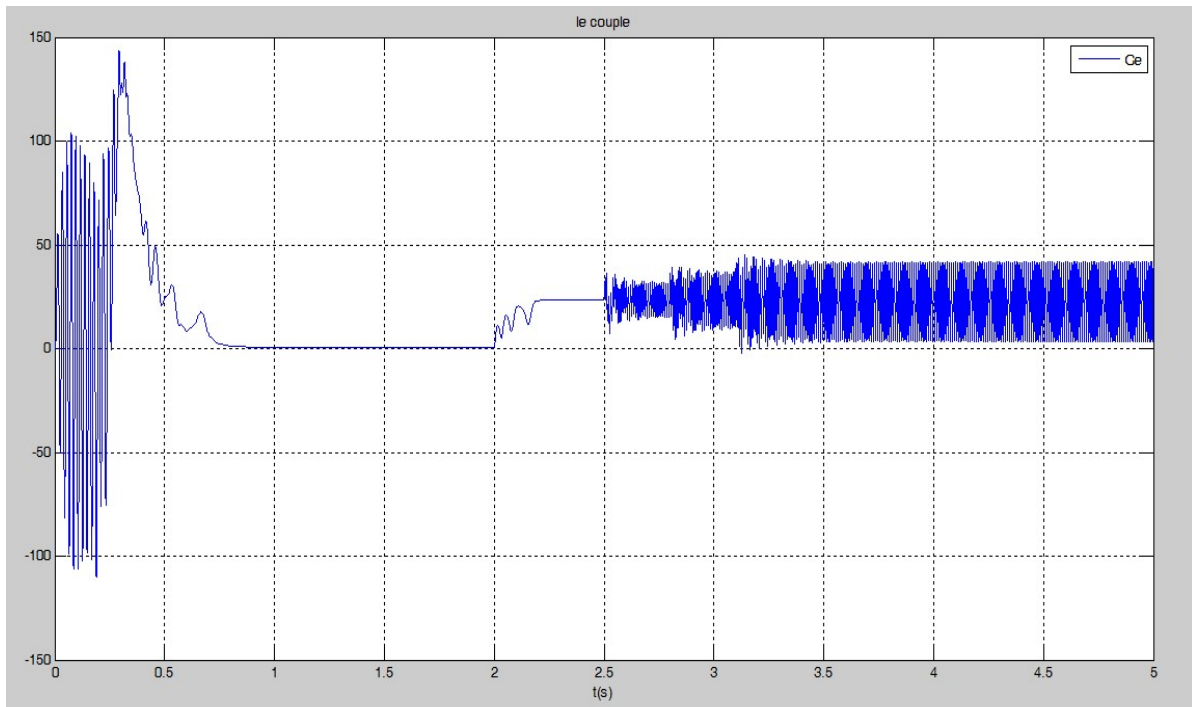


Figure 4.5. Couple de la MADA avec défaut statorique dans la phase (a)

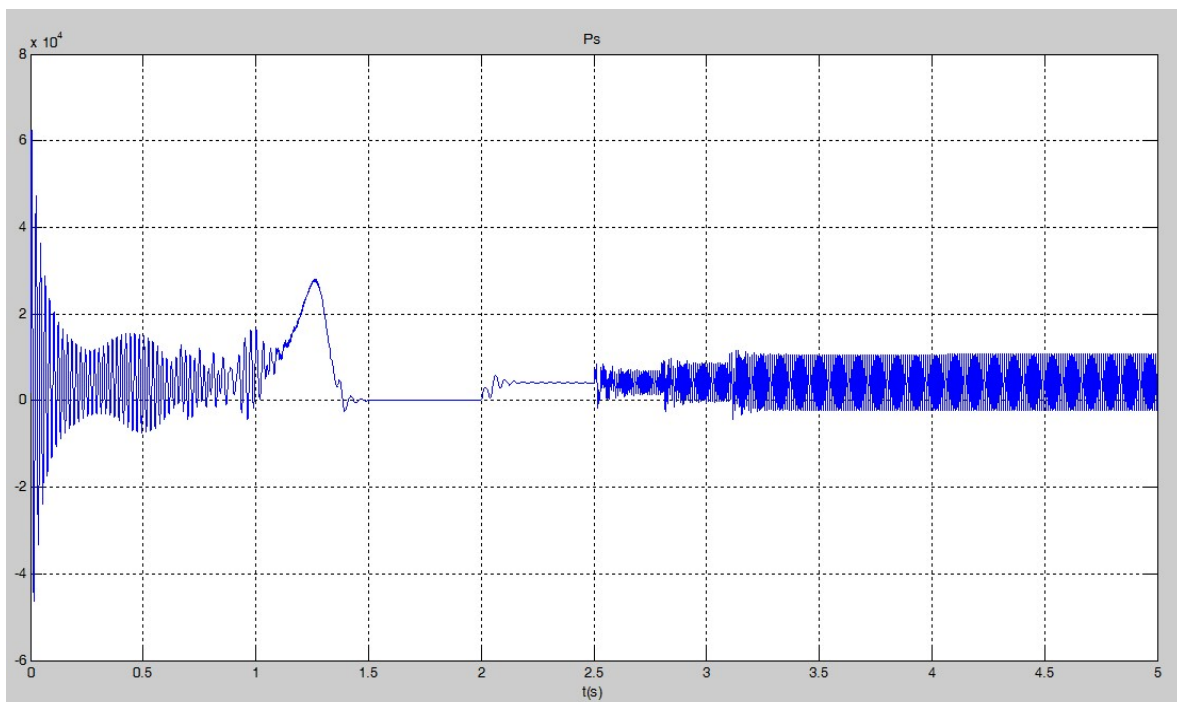


Figure 4.6. Puissance statorique de la MADA avec défaut statorique dans la phase (a).

Interprétation

Les figures (4.2) et (4.3) présentent l'évolution du courant dans la phase défectueuse en fonction du degré de défaut (CCs %). On constate que l'amplitude de ces courants augmente avec l'augmentation du degré de défaut.

Les figures (4.4) présentent les courbes de la vitesse avec les différents degrés de court-circuit. En présence de défaut, on remarque que la vitesse de la machine en état de couplage ne laisse aucun aperçu sur ce défaut.

Les figures (4.5) et (4.6) présentent les courbes du couple et la puissance statorique avec les différents degrés de court-circuit. En présence de défaut, on remarque que ces grandeurs électromagnétiques sont bruitées et bien clair.

Le défaut entraîne alors une augmentation des courants statoriques dans la phase défectueuse et aussi une légère variation de l'amplitude sur les autres phases. Il est à noter que les oscillations augmentent avec l'augmentation du degré du défaut.

4.5.2. Simulation pour un fonctionnement en court-circuit rotorique de la MADA en modèle réel (abc)

Pour décrire le comportement dynamique de la MADA avec défaut de courts circuits entre spires rotorique dans la phase (a), on simule au démarrage à vide et on applique un couple résistant égal au couple nominal $C_r = C_{em}$ à l'instant $t = 2s$ et un défaut de 2% à l'instant $t = 3s$, un deuxième défaut 3% à l'instant $t = 3.5s$, et à la fin un défaut de 4% à l'instant $t = 4s$.

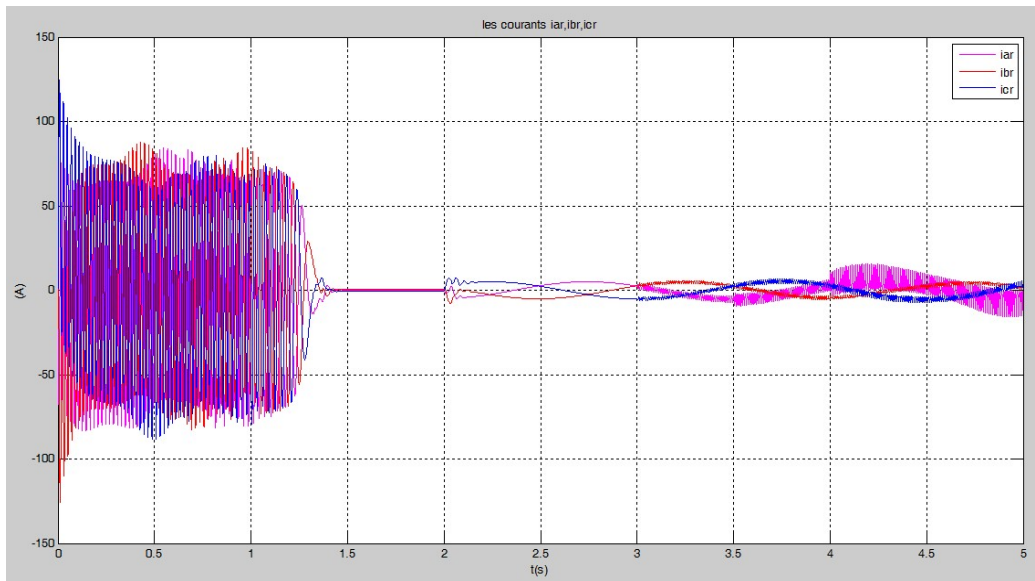


Figure 4.7. Les courants rotorique de la MADA avec défaut rotorique dans la phase (a).

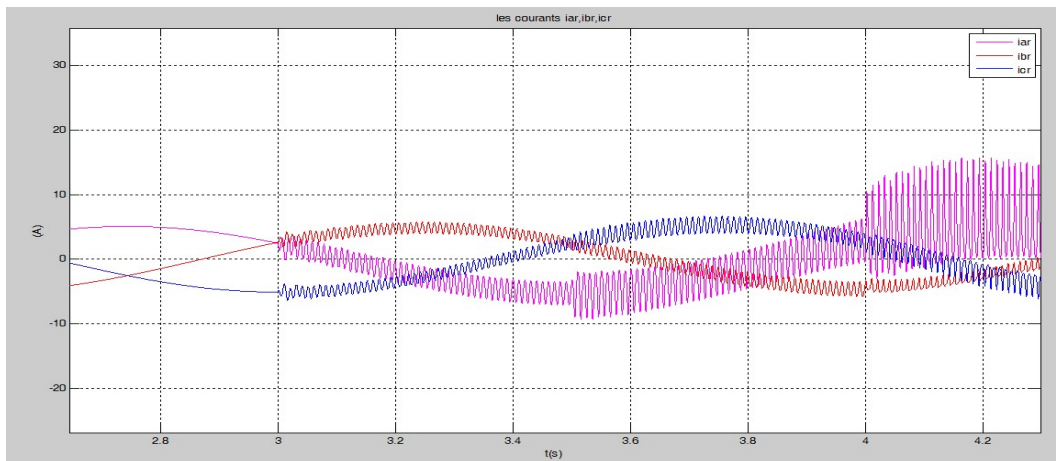


Figure 4.8. Zoom des courants rotorique de la MADA avec défaut rotorique dans la phase(a).

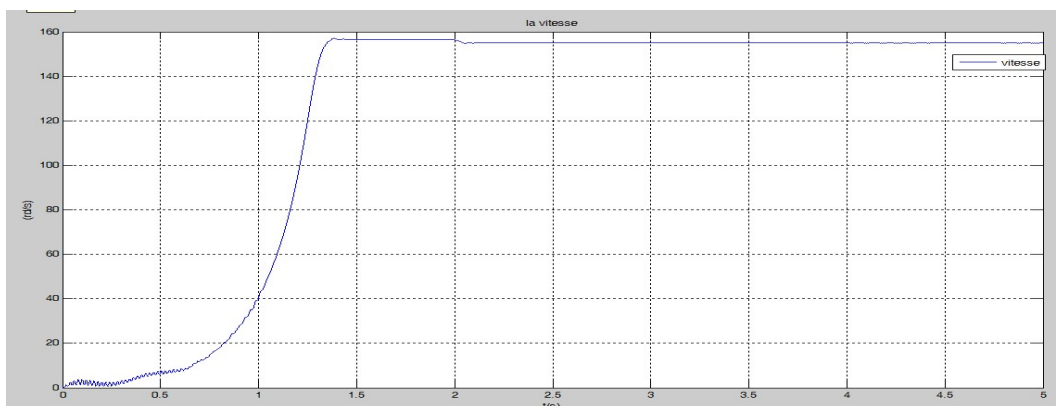


Figure 4.9. vitesse de la MADA avec défaut rotorique dans la phase (a).

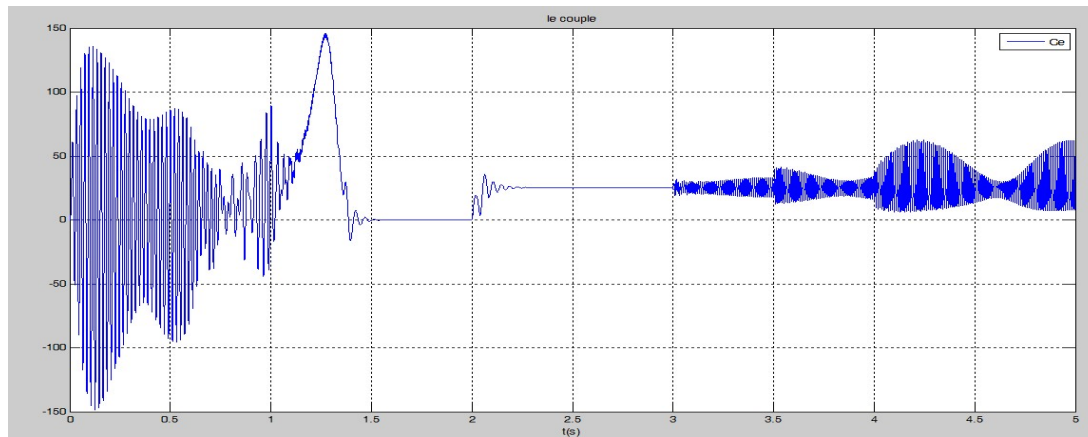


Figure 4.10. Couple de la MADA avec défaut rotorique dans la phase (a).

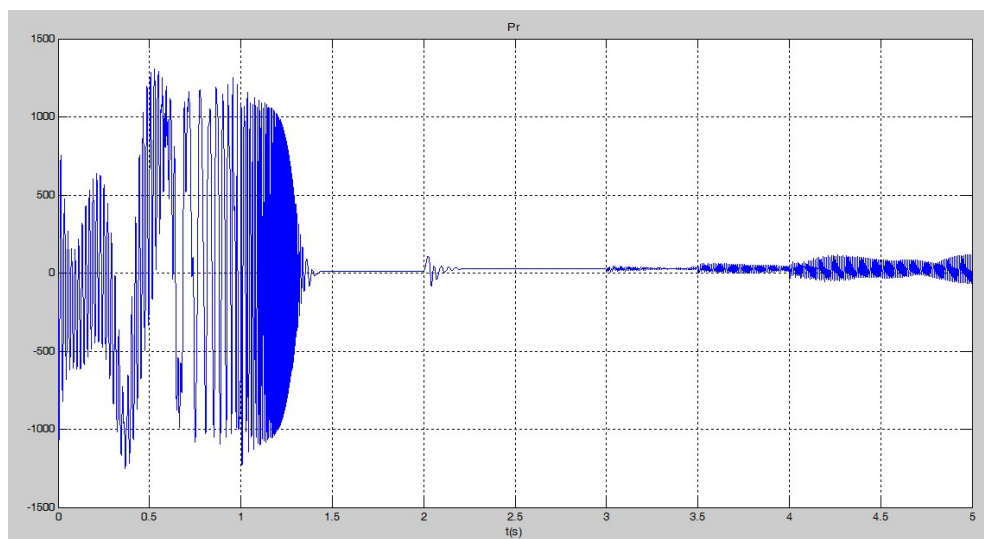


Figure 4.11. Puissance rotorique de la MADA avec défaut rotorique dans la phase (a).

Interprétation

Les figures (4.7) et (4.8) présentent l'évolution du courant dans la phase défectueuse en fonction du degré de défaut (CCs %). On constate que les harmoniques des amplitudes de ces courants augmentent avec l'augmentation du degré de défaut.

Les figures (4.9) présentent les courbes de la vitesse avec les différents degrés de court-circuit. En présence de défaut, on remarque que la vitesse de la machine en état de couplage ne laisse aucun aperçu sur ce défaut.

Les figures (4.10) et (4.11) présentent les courbes du couple et la puissance statorique avec les différents degrés de court-circuit. En présence de défaut, on remarque que ces grandeurs électromagnétiques sont bruitées et bien clair.

Le défaut entraîne alors une augmentation des harmoniques des courants statoriques dans la phase défectueuse et aussi une légère variation des harmoniques de l'amplitude sur les autres phases. Il est à noter que les oscillations augmentent avec l'augmentation du degré du défaut.

4.6. Résultat avec analyse spectral par FFT

4.6.1. Analyse spectral de la MADA en court-circuit statorique

L'objectif de cette partie consiste à identifier les signatures fréquentielles de courants statoriques, de couple électromagnétique et la vitesse causé par le court-circuit rotorique.

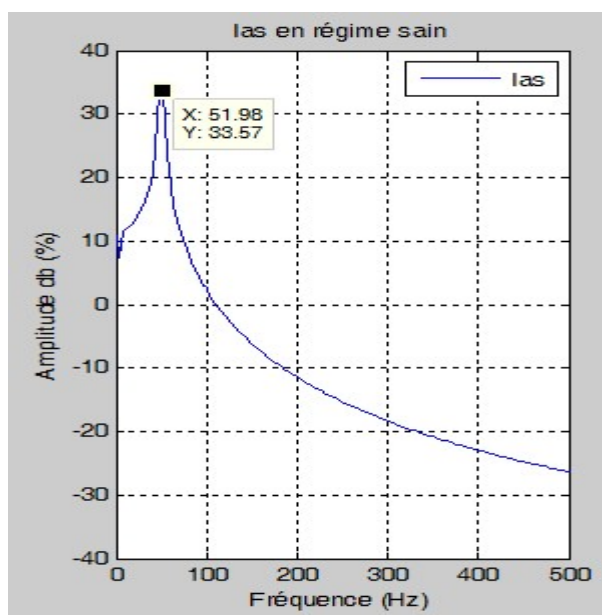


Figure 4.12. Le FFT de courant statorique sans défaut

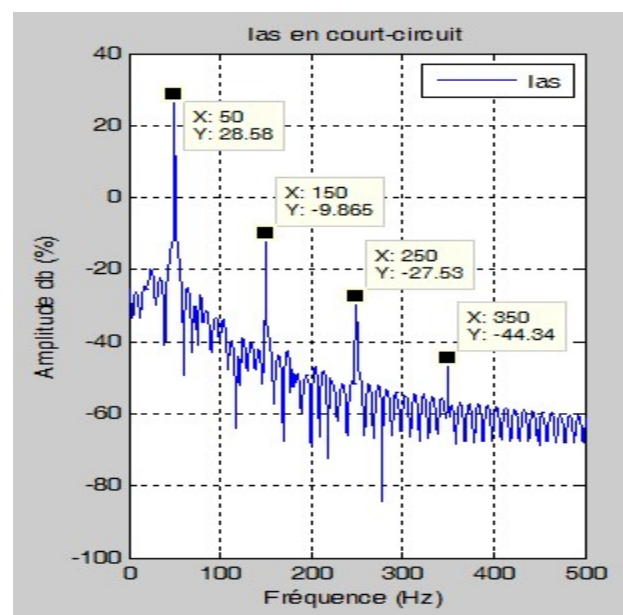


Figure 4.13. Le FFT de courant statorique avec défaut

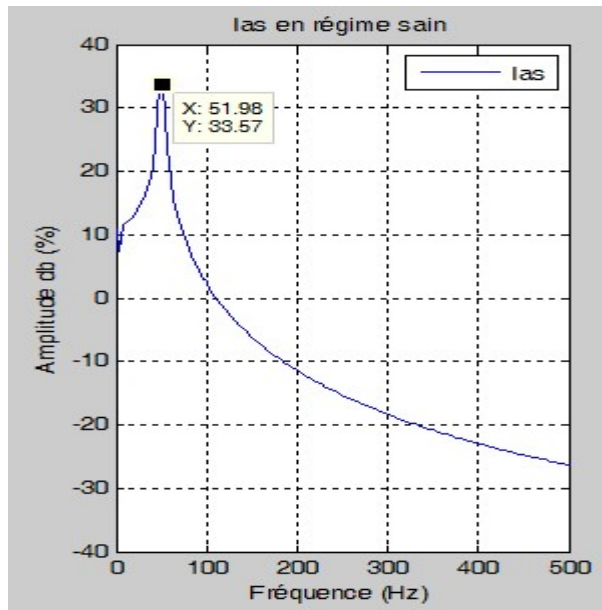


Figure 4.14. Le FFT de couple sans défaut

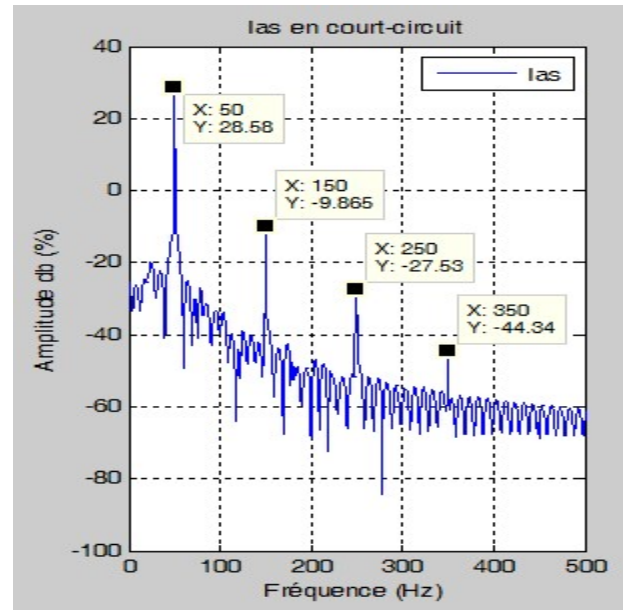


Figure 4.15. Le FFT de couple électromagnétique défaut

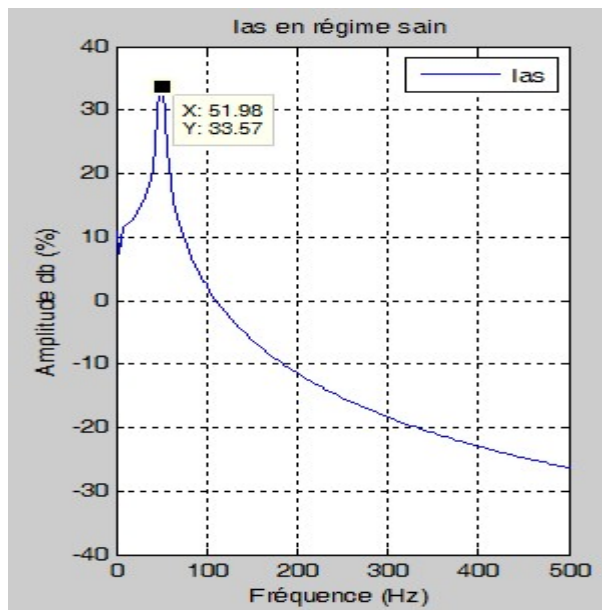


Figure 4.16. Le FFT de la vitesse sans défaut

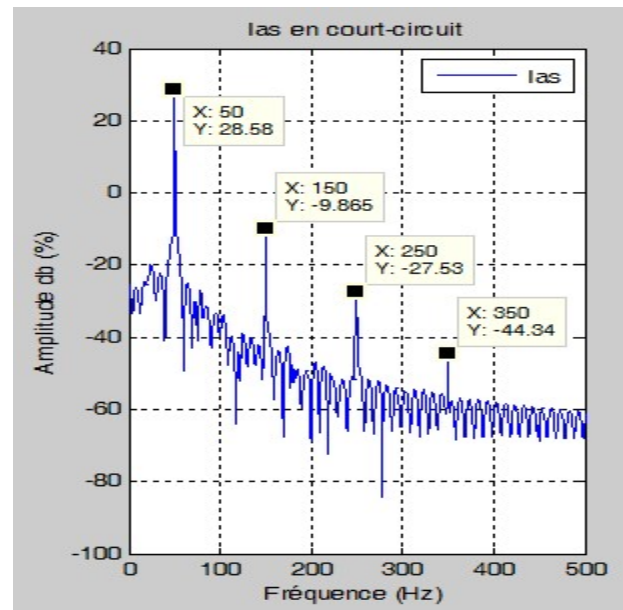


Figure 4.17. Le FFT de la vitesse avec défaut

Interprétation

Chaque ampleur de court-circuit laisse une signature sur le spectre du courant statorique et le couple électromagnétique qui se traduit par l'apparition des raies latérales

autour de la fréquence fondamentale. On observe sur les figures (FFT « Is », FFT « Ce ») une augmentation de [62 dB] sur la raie [50 Hz] et une augmentation de [74 dB] sur la raie de [0 Hz]. On remarque aussi, une augmentation sur les autres raies de spectre au niveau du couple et le courant lors d'un court-circuit statorique. Ses raies sont dues à cause de l'influence de court-circuit statorique sur les grandeurs électromagnétique.

4.6.2. Analyse spectral de la MADA en court-circuit rotorique

L'objectif de cette partie consiste à identifier les signatures fréquentielles de courants rotorique, de couple électromagnétique et la vitesse causés par le court-circuit rotorique.

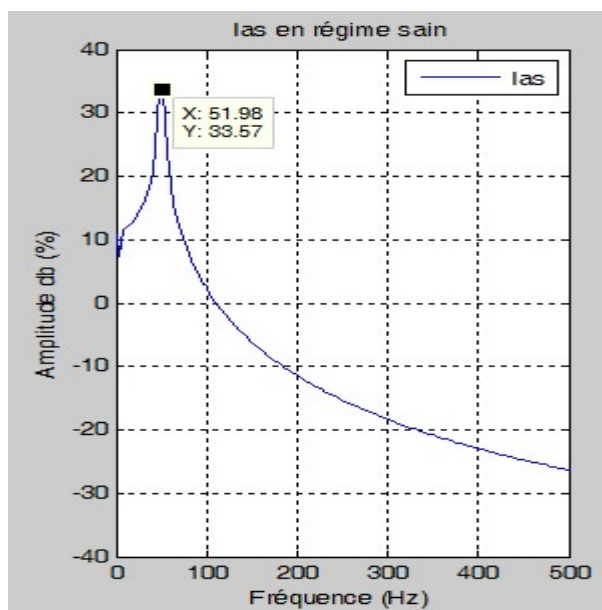


Figure 4.18. Le FFT de courant rotorique sans défaut

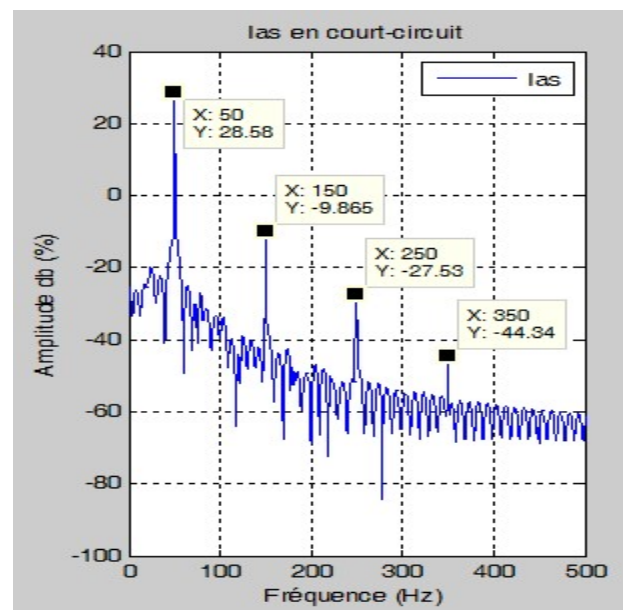


Figure 4.19. Le FFT de courant rotorique avec défaut

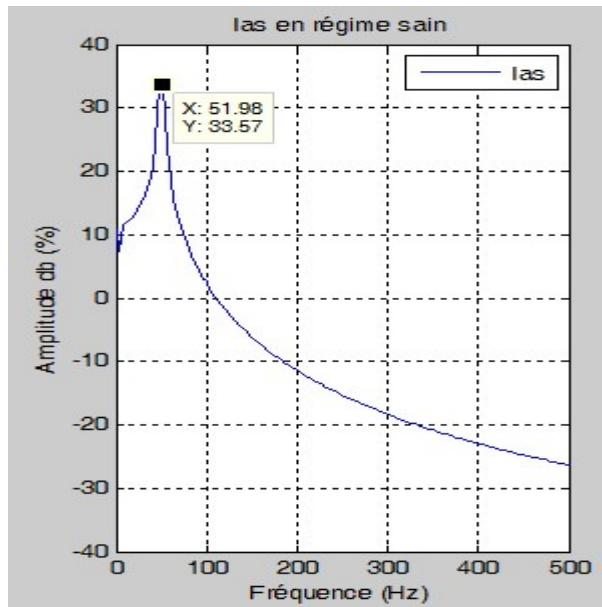


Figure 4.20.Le FFT de couple électromagnétique sans défaut

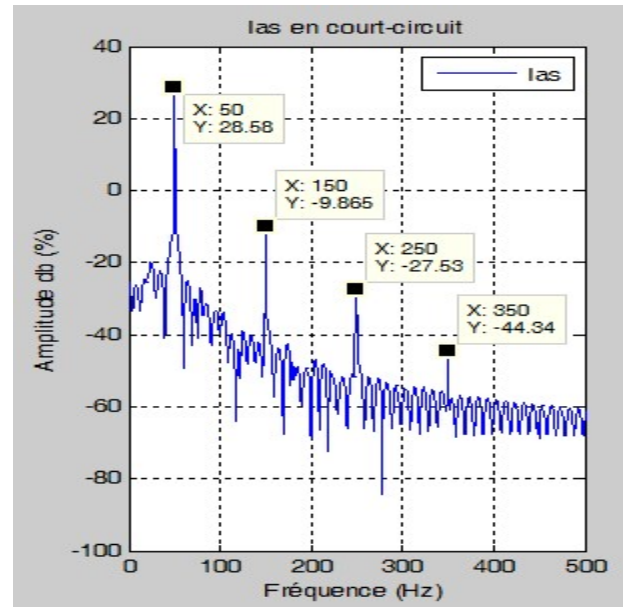


Figure 4.21.Le FFT de couple électromagnétique avec défaut

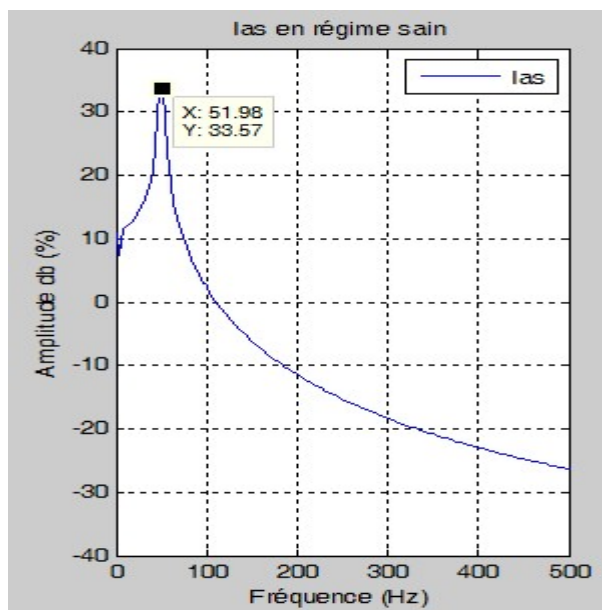


Figure 4.22.Le FFT de la vitesse sans défaut

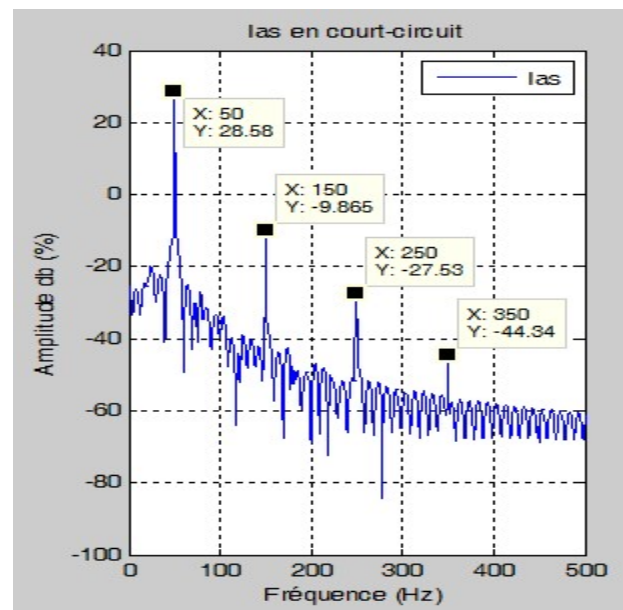


Figure 4.23.Le FFT de la vitesse avec défaut

Interprétation

Chaque ampleur de court-circuit laisse une signature sur le spectre du courant statorique et le couple électromagnétique qui se traduit par l'apparition des raies latérales autour de la fréquence fondamentale. On observe sur les figures (FFT « Is », FFT « Ce ») une augmentation de [62 dB] sur la raie [50 Hz] et une augmentation de [74 dB] sur la raie de [0 Hz]. On remarque aussi, une augmentation sur les autres raies de spectre au niveau du

couple et le courant lors d'un court-circuit rotorique. Ses raies sont due a cause de l'influence de court-circuit rotorique sur les grandeurs électromagnétique.

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé à la modélisation de la **MADA** en présence de défaut de court-circuit entre les spires dans une seule phase et multi-phases, deux modèles mathématiques sont proposées et sont considérées comme deux scénarios de défauts différents, un ensemble de nouveaux paramètres sont introduits pour représenter.

Quantitativement le défaut, Tout d'abord, les modèles trois phases dans le plan a-b-c sont développés. Ensuite le modèle d-q simplifié est obtenu en utilisant une transformation de PARK. Sur la base des équations du modèle, les circuits équivalents dynamiques de MADA avec les défauts de court-circuit sont prévus. En analysant les circuits équivalents, les caractéristiques des défauts et de ses effets sur la MADA sont présentées à la dernière section et sont en outre démontrés par les résultats de simulations.

Notre étude nous a permis de réaliser une modélisation complète et globale d'un système de génération d'électricité à partir de l'énergie éolienne pour un fonctionnement sain et avec défaut de court circuit statorique et rotorique.

La première étape de la première partie a été consacrée à des généralités sur l'éolienne accompagnées d'un état de l'art sur la conversion électromécanique. Puis nous avons intéressé à différents types d'éoliennes existant en abordant leurs différentes structures, leurs fonctionnements, leurs qualités et éventuellement leurs défauts. Ensuite, nous avons donné quelques notions théoriques sur les calculs de base qui permettent de contrôler le fonctionnement de notre système par la suite.

Dans la deuxième partie Nous avons présenté la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le cas de fonctionnement sain. En suite, nous avons décrit l'étude d'une cascade basée sur deux convertisseurs **MLI** à deux niveaux (redresseur à deux niveaux commandés par la stratégie hystérésis et onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale) associés à la machine asynchrone à double alimentation. La modélisation et l'application du redresseur à **MLI** nous a permis la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la **MADA**. Les résultats de simulation sont interprétés au logiciel MATLAB.

Dans le troisième chapitre nous avons établi une analyse des performances d'une chaîne éolienne en régime sain. Une modélisation nous a permis de simuler son comportement en régime équilibré, on suppose que la vitesse du vent varie légèrement au régime permanent. Puis, on a déduit les caractéristiques aérodynamiques principales de la turbine. Ensuite, nous avons développé un modèle pour le contrôle indépendant des puissances actives et réactives statoriques en parlant de la commande vectorielle directe de la **MADA** à flux statorique orienté (la **MADA** est intégrée dans un système éolien). Dans cette partie, nous avons présenté une étude théorique dans laquelle nous avons exprimé les puissances actives et réactives statoriques en fonction des courants rotoriques. A la fin de ce chapitre nous avons simulé et analysé le modèle de la chaîne de conversion d'énergie éolienne en régime sain.

Dans le quatrième chapitre ,nous avons présenté le diagnostic de MADA en présence de défauts de court-circuit statorique et rotorique en les modélisant .Cette modélisation nous a

permis de simuler un comportement des différentes grandeurs électriques, magnétiques et mécaniques pour MADA en mode simple et réel. On a simulé et analysé le modèle lorsque la machine connaît un défaut de court-circuit, une performance des puissances doit satisfaire cette analyse. Les résultats de simulation sont interprétés, la transformée de Fourier rapide (FFT) (Fast Fourier Transform) est exploitée pour l'étude et l'analyse spectrale du courant statorique et rotorique par conséquent de déterminer les composantes et les raies caractérisant les défauts le courant statorique et rotorique. Nous avons pu observer très clair que les variations des grandeurs ne sont pas remarquables pour le domaine temporel.

Bibliographie

- [1] Brendan Fox et coll. <<Energie Eolienne et intégration au réseau >>
- [2] Marc Rapin et Jean-Marc Noel << Energie Eolienne Principes – Etudes de cas >>
- [3] A. MIRECKI, << Etude Comparative de Chaînes de Conversion d’Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance >>, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, (2005).
- [4] J. MARTIN, « Energies éoliennes », techniques de l’ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [5] V. Courtesuisse, << Supervision d’une centrale multisource à base d’éoliennes et de stockage d’énergie connectée au réseau électrique >>, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Nationale d’Arts et Métiers, 2008.
- [6] F. PITIERS, « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003.
- [7] E. HAU, « Wind turbines », 2nd Ed Springer, 2006.
- [8] N. MEKKAOU, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d’une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, (2004).
- [9] M. BARAKATI, « Modeling and Controller Design of a Wind Energy Conversion System Including a Matrix Converter » these de doctorates University de Waterloo, Canada, (2008).
- [10] A. BOYETTE, « Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne», thèse de doctorat de l’université Henri Poincaré Nancy I, 11 décembre, 2006.
- [11] R.MENNICHE et A. SLIMANI,«Intégration d’une chaîne éolienne au réseau », Mémoire d’Ingéniorat .U.S.T.H.B .Algérie, 2009.
- [12] H. BOUKHARI et S.GUERMACHE,«Étude d’une éolienne à vitesse variable avec génératrice asynchrone pilotée par le stator », Mémoire de Master, USTHB, 2010.
- [13]R.KEZERLI, « Alimentation et Commande d’une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multi-niveaux », Mémoire de Magister, USTHB, 2009.
- [14] F. PITIERS, « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à double alimentation relié au réseau » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003.
- [15] A.ABDELLI, << Optimisation Multicritères d’une chaine éolienne passive>> Thèse de Doctorat en Electrotechniques, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

Bibliographie

[16] B .Robyns . A. Davigny, C. Saudemont, A.Ansel, V.Courtecuisse, <<Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité d'énergie >>, J3eA, Vol.5-Hors série I, 2006.

[17] S. El Aimani,<< Modélisation de différentes technologies d'éolienne intégrées dans un réseau de moyenne tension >>, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.

[18] R. Melicio, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalao, << Computer simulation of wind power systems: Power Electronics and Transient Stability Analysis >>, International Conference on Power System Transient (IPST 2009), Kyoto, Japan, Juin 3-6, 2009.

[19] J-C. Sabonnadière, << Nouvelles technologies de l'énergie 1 >>, Lavoisier, 2006.

[20] P .Leconte, M.RAPINE << EOLIENNE >> Technique de l'ingénieur.

[21] Hamicha Samira << Etude et commande d'une éolienne à base d'une Machine synchrone >>, Thèse de Magister, 2013.

[22] REDJEM RADIA. << Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne >>, Mémoire de Magister UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2009.

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

[24] HAMZAOU Ihsen. << Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur >>, thèse de magister, école nationale polytechnique Alger, promotion, 2008.

[25] MOKRANE SMAILI -Août 2013 << Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération >> Université de Québec Abitibi-Temiscamingue.

[26] Camblong, Haritza, << Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable >>. At : Automatique : École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Bordeaux : 2003, 274p

[27] O.Gergaud, B.Multon, H.Ben Ahmed, << Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne >>, Electronique de Futur, 2001, pp.17-22. Nancy, Novembre 2001.

[28] J. Lesenne, F. Notelet, G. Séguier, « Introduction à l'électrotechnique approfondie », Technique et documentation, Paris, ISBN 2-85206-089-2, 1981.

[29] B. ROBYNS, M.ESSELIN, « Power control of an inverter. Transformer association in a wind generator », Electromotion, vol.6, No. 1-2, 1999, pp.3-7.

Bibliographie

- [30] P. BARRET, « Régime transitoire des machines électriques tournantes ». Ecole supérieure d'Electricité, Eyrolles, Paris, 1982.
- [31] J.C. PRESCOTT AND B.P. RAJU. « The inherent instability of induction motors under condition of double supply». The Institute of Electrical Engineers Monograph, Jan, 1958.
- [32] KELBER C. AND SCHUMACHER W, « Control of Doubly fed induction Machine as an Adjustable Motor/Generator », Proceedings of European Conference of Variable Speed in Small Hydro , Grenoble, 2000.
- [33] GUY SEGUIER, FRANCIS LABRIQUE, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance", tome 4 la conversion continu-alternatif.
- [34]HOBERT BAUSIERE, GUY SEGUIER, FRANCIS LABRIQUE, « Electronique de puissance, structure, fonction de base, principales applications », 8 ème édition.
- [35]ABBAS MOURAD, MECHENTEL MOHAMED, « Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée par une Cascade à Trois Niveaux application à l'Energie Eolienne », Ingénieur d'Etat en Electrotechnique. ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE. Soutenue : 2006.
- [36] E. M. BERKOUK. « Contribution à la Conduite des Machines Asynchrones Monophasées et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects. Application aux Gradateurs et Onduleurs Multi niveaux ». Thèse de doctorat, C.N.A.M, PARIS 1995.
- [37] BELAZZOUG, SEBAA, « Etude des redresseurs multi-niveaux à MLI ».PFE, ENP 1997, Alger
- [38]ACHOURI RADOUANE & HIDOUCHE MOHAMED, « Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone « Simulation sur le logiciel SIMPLORER», Validation expérimentale sur banc d'essai » Thèse de ingénieur, Electrotechnique Ecole National Polytechnique, 2007.
- [39]-A. Meroufel. « Commande scalaire Commande vectorielle Commande directe du couple » Thèse d'ingénieur d'état, Electrotechnique, Université Djilali Liabès , Sidi Bel Abbès, 2009
- [40] MTOUK et BOUGHERBAL.A « Etude d'un MPPT d'une éolienne ».Mémoire d'ingénieur .U.S.T.H.B Algérie.2010.
- [41] HAMZAOUI FAROUK & BAGHA ABDERRAHMANE « *Analyse des performances d'une chaine éolienne* » Mémoire d'ingénieur .U.S.D.B, Algérie.2014
- [42] F.Boumaaraf, « Commande intelligente d'une association convertisseur statique - machine asynchrone à double alimentation » .Mémoire de magister Université de Batna 2009
- [43] O. Bennouna, « diagnostic des systèmes linéaires dynamiques application à un système à énergie renouvelable de type éolien », Mémoire de doctorat. CORSE 2006.

Bibliographie

[44] A. Aimer, « Emploi de la représentation temps-fréquence dans le diagnostic des défauts des machines asynchrones à cage » Mémoire de magister, université d'Oran 2010.

[45] O. Ondel, « Diagnostic par reconnaissance des formes : application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone », Thèse de Doctorat d'Etat. Ecole Centrale de Lille 2006.

[46] A. Brahim, « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques: Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée » thèse de doctorat, université de Saint-Etienne mars 2009.

[47] Mohammedi Mokhtar , <<commande tolérante aux défauts de la machine asynchrone a double alimentation>> thèse de Magister ,université USTO Oran-2014

[48] TAMER Amina« Détection de Défauts de la Génératrice Asynchrone a Double Alimentation (DFIG)» Mémoire en vue de l'obtention de diplôme de Magister. 2011. Oran