

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département de Génie Electrique

Spécialité Electrotechnique

Projet de fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique

Thème

**Etude et Commande d'un Système Eolien avec Amélioration de
la Qualité du Réseau Electrique**

Proposé et dirigé par :

✓ *Pr. M.O.MAHMOUDI*

✓ *Pr. E.M.BERKOUK*

Réalisé par :

–*AGGAD Salim*

–*TOUATI Abdelghani*

PROMOTION : Juin 2012

Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi El-Harrach, Algérie.

AVANT PROPOS

Nous remercions **Dieu** de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions Messieurs les Professeurs **M.O.MAHMOUDI** et **E.M.BERKOUK** qui ont suivis de très près ce travail, pour leurs aides, leurs orientations pédagogiques dans l'élaboration de ce projet, et tous les conseils qu'ils nous ont prodigués pendant toute la durée de ce travail malgré leurs nombreuses occupations.

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux **Membres de jury** pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant la charge de juger ce travail.

Nous sommes reconnaissants envers nos **Enseignants** auxquels nous devons notre formation en électrotechnique grâce à l'enthousiasme qu'ils ont pu nous communiquer en tant qu'étudiants lors de notre cursus d'études à l'Ecole Nationale Polytechnique.

Enfin, nous ne pourrions terminer ces remerciements sans avoir remercier **nos Familles** pour leurs aides, compréhensions, encouragements et soutiens, qu'elles nous ont apportés tout le long de nos études.

A tous nos **Amis** et ceux qui nous aiment et nous connaissent.

DEDICACES

A qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et l'encouragement sont l'essentiel de ma réussite. Sans eux, je ne serai pas là aujourd'hui.

Je dédie ce travail également :

A mes frères et mes sœurs

Aux deux familles AGGAD & BRAHIMI

A tous mes amis

A tous ceux dont les noms m'ont échappé.

SALIM

DEDICACES

A qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et l'encouragement sont l'essentiel de ma réussite. Sans eux, je ne serai pas là aujourd'hui.

Je dédie ce travail également :

A mes frères et mes sœurs

A la famille TOUATI

A mes amis Salim, Tarek, Aziz, Hamid, Sofiane, Omar

A tous ceux dont les noms m'ont échappé.

ABDELGHANI

Résumé

Ce travail a pour but l'étude et la commande d'un système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA), en vue d'améliorer la qualité d'un réseau électrique. Le stator de la machine est connecté directement au réseau tandis que son rotor est connecté via une cascade d'un redresseur à trois niveaux-onduleur à trois niveaux. Nous avons en premier lieu élaboré des modèles de commande pour chacun des éléments de la cascade, la technique de commande par M.L.I triangulo-sinusoidale à deux porteuses est appliquée pour l'onduleur, alors que le redresseur est commandé par la technique d'hystérésis en courant. La commande en puissances active et réactive rotorique est appliquée pour la machine.

Mots clés

Eolienne, MPPT , Machine asynchrone à double alimentation , Redresseur à trois niveaux , Onduleur à trois niveaux, Commande vectorielle en P et Q .

Abstract

The purpose of this work is study and control of a wind system based on the doubly fed induction machine (DFIM), in order to improve quality of network supply. The stator of the machine is connected directly to the network supply, while its rotor is connected through a cascade of three levels rectifier-three levels inverter. We initially elaborate models of control for each element of the cascade; the technique of order by triangulo-sinusoidal M.L.I with two carryings is applied for the inverter, whereas the rectifier is ordered by the technique of hysteresis in current. The active and reactive power rotor control is applied for the machine. The results of simulation obtained showed a satisfying behavior of the cascade.

Key words

Wind mill, MPPT, Doubly Fed Induction Machine, Three levels rectifier, Three levels inverter, Vector control in P and Q .

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة مراقبة نظام طاحونة الهواء المكونة من محرك لا تزامني ثنائي التغذية-مقوم ذو ثلاثة مستويات_موج ذو ثلاثة مستويات.

للحصول على أفضل تحكم و مردودٍ نقترح تطبيق التقنيات التالية
تقنية الحقل الموجه. تقنية تعديل سعة النبضة للموّد. تقنية التحكم بواسطة التيار
من إيجابيات نضام التحكم هذا منح الشبكة الكهربائية خدمات أخرى كتصفيّتها من الموجات الغير المنتظمة.

الكلمات المفتاح

طاحونة الهواء, تقنية الحصول على الطاقة العظمى, محرك لا تزامني ثنائي التغذية, مقوم ذو ثلاثة مستويات,
موج ذو ثلاثة مستويات, تقنية الحقل الموجه, تقنية تعديل سعة النبضة للموّد, تقنية التحكم بواسطة التيار

Notations

MADA : Machine Asynchrone Double Alimentation

MPPT : Maximum Power Point Tracking (Technique d'extraction de maximum de puissance)

N.P.C : Point Neutre Clamping. « Structure à point milieu »

s, r : Indices correspondants respectivement aux enroulements statoriques et rotoriques

s_a, s_b, s_c : Phases des enroulements statoriques

r_a, r_b, r_c : Phases rotoriques.

d, q : Axes correspondants au référentiel lié au champ tournant.

θ : Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor

θ_s : Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d

θ_r : Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement rotorique et l'axe d

g : Le glissement

$V_{abc,s}$: Tensions des trois phases de l'enroulement statorique

$i_{abc,s}$: Courants des trois phases de l'enroulement statorique

$i_{abc,r}$: Courants des trois phases de l'enroulement rotorique

$\Phi_{s,abc}$: Flux des trois phases de l'enroulement statorique

$\Phi_{r,abc}$: Flux des trois phases de l'enroulement rotorique

L_s, L_r : Inductances de fuite respectivement de l'enroulement statorique et le rotor

M_s, M_{sr}, M_r : Inductances de fuite mutuelles

C_{em} : Couple électromagnétique

f_r : Coefficient de frottement

C_r : Couple résistant

J : Moment d'inertie

P : Nombre de paires de pôles

$V_{dq,s}$: Tensions de l'enroulement statorique dans l'axe d - q

$V_{dq,r}$: Tensions de l'enroulement rotorique dans l'axe d - q

$i_{dq,s}$: Courants de l'enroulement statorique dans l'axe d - q

$i_{dq,r}$: Courants de l'enroulement rotorique dans l'axe d - q

$\Phi_{dq,s}$: Flux de l'enroulement statorique dans l'axe d - q

$\Phi_{dq,r}$: Flux de l'enroulement rotorique dans l'axe d - q

Φ_r : Flux rotorique résultant

$P(\theta_s)$: Matrice de Park correspondant aux enroulements statoriques.

$P(\theta_r)$: Matrice de Park correspondant aux enroulements rotoriques.

M : Point milieu fictif de l'onduleur triphasé.

V_{KM} : Différence de potentiel entre le bras k et le point fictif M de l'onduleur

P_r : Puissance active rotorique

Q_r : Puissance réactive rotorique
 m : Indice de modulation
 r : Taux de modulation
 f_p : Fréquence de la porteuse
 f : Fréquence
 U_{pm} : Tension maximale de la porteuse
 $V_{ref1,2,3}$: Tensions de référence
 $i_{ref1,2,3}$: Courants de référence
 V_e : Valeur efficace de la tension du réseau
 S : Operateur de Laplace
 Ω_{rn} : Vitesse nominale de la machine
 U_c : Tension d'entrée d'un niveau de l'onduleur
 K : Numéro du bras de l'onduleur
 U_{c1}, U_{c2} : Tensions d'entrée de l'onduleur à trois niveaux
 $i_{d1ond}, i_{d2ond}, i_{d0ond}$: Courants d'entrée de l'onduleur à trois niveaux
 C_1, C_2 : Capacités du filtre intermédiaire de l'onduleur à trois niveaux
 $i_{d1red}, i_{d2red}, i_{d0red}$: Courants redressés
 $V_{res,1,2,3}$: Tensions des trois phases du réseau
 $i_{res,1,2,3}$: Courants des trois phases du réseau
 P_{res} : Puissance du réseau
 P_{Jr} : Pertes Joule rotoriques
 $\cos \varphi$: Facteur de puissance
 V_A, V_B, V_C : Tensions d'entrée du redresseur
 I_e : Valeur efficace de courant de référence
 ω_s, ω_r : Pulsations électriques respectivement du stator et du rotor
 L : Inductance du réseau
 Δi : Bande d'hystérésis en courant
 σ : Coefficient de dispersion magnétique
 P_{vent} : Puissance du vent
 ρ : Masse volumique du vent
 V_{vent} : Vitesse du vent
 C_p : Coefficient de puissance
 β : Angle de calage
 P_t : Puissance de la turbine
 λ : Facteur d'avance
 Ω_t : Vitesse de la turbine
 Ω_r : Vitesse du rotor de la génératrice
 V_{max} : Vitesse maximale du vent
 G : Rapport des vitesses du multiplicateur

R : Longueur de la pale

Table des matières

Introduction générale.....	4
Chapitre I : Etat de l'art sur les éoliennes	5
I.1 : Historique.....	5
I.2 : Introduction.....	5
I.3 : Quelques notions sur le vent	6
I.4 : Différents types d'éoliennes	7
I.4.1 : Eolienne à axe vertical	7
I.4.2 : Eolienne à axe horizontal.....	8
I.5. Différentes parties d'un aérogénérateur.....	9
I.6 Principe de fonctionnement	11
I.7 Puissance susceptible d'être recueillie par les pales : Théorème de Betz.....	13
I.8 Modélisation Turbine-Arbre-Multiplicateur	15
I.8.1 Modèle du multiplicateur	16
I.8.2 Modèle de l'arbre.....	16
I.8.3 Schéma bloc du modèle de la turbine	17
I.9 Stratégies de commande de la turbine éolienne	18
I.9.1 Extraction du maximum de puissance « MPPT »	18
I.9.2 Schéma bloc de la turbine avec MPPT	20
I.9.3 Différentes phases de fonctionnement	20
I.9.4 Système d'orientation des pales	21
I.9.5 Simulation de la turbine éolienne.....	22
I.10 Raccordement au réseau	22
Conclusion.....	24
Chapitre II : Modélisation de la MADA et l'onduleur à trois niveaux	25
II.1 Modélisation de la MADA	25
Introduction	25
II.1.1 Description du fonctionnement de la MADA.....	26
II.1.1.1 Structure de la machine.....	26
II.1.1.2 Modes de fonctionnement de la MADA.....	26
II.1.2 Modélisation de la MADA	28
II.1.2.1 Hypothèses simplificatrices	28
II.1.2.2 Les équations électriques.....	29

II.1.2.3 Equation mécanique.....	29
II.1.3 Modèle de la MADA dans la configuration de Park.....	29
II.1.3.1 Modèle de la MADA lié au champ tournant.....	31
II.1.4 Mise sous forme d'équations d'état.....	31
Conclusion.....	32
II.2 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux	32
Introduction.....	32
II.2.1 Structure générale d'un onduleur à trois niveaux	33
II.2.2 Modélisation du fonctionnement de l'onduleur triphasé à trois niveaux.....	34
II.2.3 Différentes configurations d'un bras d'onduleur	34
II.2.4 Fonctionnement d'un bras d'onduleur.....	35
II.3 Modèle de connaissance et de commande de l'onduleur à trois niveaux	36
II.3.1 Commandabilité des convertisseurs statiques :.....	36
➤ Hypothèses	36
VA + VB + VC = 0 i1 + i2 + i3 = 0 (II.10)	36
II.3.2 Commande complémentaire d'un onduleur à trois niveaux	36
II.3.3 Fonction de connexion des interrupteurs.....	36
II.3.4 Fonction de connexion d'un demi-bras	37
❖ Notations	37
Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux le vecteur d'état est : [Uc1 Uc2 i1 i2 i3] ^t	39
II.4 Stratégie de commande de l'onduleur à trois niveaux à structure N.P.C	39
II.4.1 La commande triangulo-sinusoidale à deux porteuses	39
II.4.2 Algorithme de commande.....	40
II.4.2.1 Caractéristiques des tensions de référence.....	41
II.5 Simulation et interpretation	42
II.6 Les harmoniques.....	44
Conclusion.....	44
Chapitre III : Commande vectorielle en puissances active et réactive de la MADA	46
Introduction.....	46
III.2 Stratégie de commande de la MADA.....	46
III.2.1 Commande vectorielle en puissance active et réactive de la MADA.....	46
III.2.2 Structure d'alimentation en tension de la machine.....	48
III.2.3 Structure du bloc de découplage.....	49
III.2.4 Le schéma bloc de la structure de commande de la MADA alimentée en tension.....	50

III.2.5 Calcul des paramètres des régulateurs de courant	51
III.3 Simulation et interprétation	53
Conclusion	56
Chapitre IV : Cascade Redresseur trois niveaux-Onduleur trois niveaux-MADA-Turbine.....	57
Introduction	57
IV.1 Redresseur triphasé à trois niveaux.....	57
IV.1.1 Modélisation du redresseur	57
IV.1.2 Commande par hystérésis en courant appliquée au redresseur	58
IV.1.3 Commandabilité du redresseur.....	59
IV.1.4 Commande en courant par hystérésis.....	59
IV.1.5 Algorithme de la commande en courant par hystérésis.....	60
IV.1.6 Simulation et interprétation.....	60
IV.2 Cascade redresseur N.P.C à trois niveaux- Onduleur N.P.C à trois niveaux- MADA-Turbine...	62
IV.2.1 Structure de la cascade	62
IV.2.2 Modélisation du filtre intermédiaire de la cascade.....	63
IV.II.3 Contrôle des courants côté réseau	64
IV.3 Simulation	66
Conclusion	71
Chapitre V : Filtrage actif par l'éolienne.....	72
V.1 Qualité de l'énergie électrique.....	72
V.2 Filtrage	72
V.2.1 Compensation des harmoniques par un filtre parallèle.....	73
V.3 Principe d'utilisation de l'éolienne comme un filtre actif.....	73
V.3.1 Identification des courants harmoniques	74
V.4 Méthode des puissances réelle et imaginaire en utilisant la transformation de Park.....	75
V.4.1 Calcul des différentes composantes de tension et de courant de la charge non linéaire...	75
V.5 Application du filtre actif par l'éolienne à la charge non linéaire	77
V.5.1 Modélisation de la charge polluante	77
V.6 Filtrage actif convertisseur côté réseau	77
V.6.1 Principe de fonctionnement	77
V.6.2 Commande en courant du convertisseur côté réseau dans le repère d-q	78
V.7 Simulation et interprétation	79
V.8 Filtrage d'une charge linéaire déséquilibrée.....	82
V.8.1 Résultats de simulation	83

Conclusion	86
Conclusion générale	87

Liste des figures

Figure I.1 : Eolienne à axe vertical.....	6
Figure I.2: Eolienne à axe horizontal	6
Figure I.3 : Constitution d'une éolienne.....	8
Figure I.4 : La nacelle.....	9
Figure I.5 : Variation du C_p en fonction du rapport de vitesse	11
Figure I.6: Bilan des forces	12
Figure I.7: théorie de Betz.....	13
Figure I.8 : Coefficient de puissance.....	14
Figure I.9 : Influence de λ sur le coefficient de puissance	15
Figure I.10 : Modèle simplifié de la turbine.....	16
Figure I.11 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne	17
Figure I.12 : Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite	18
Figure I.13 : Schéma bloc fonctionnel de la turbine avec MPPT.....	19
Figure I.14: les quartes zones de fonctionnement de la turbine	19
Figure I.15 : Schéma bloc de système d'orientation des pales.....	21
Figure I.16 : Résultat de simulation de la turbine éolienne	21
Figure I.17 : Exemple de connexion directe au réseau.....	22
Figure I.18 : Eolienne basée sur une machine asynchrone à double	23
Figure I.19 : Exemple de connexion indirecte au réseau.....	23
Figure II.1 : Structure du stator et contacts glissants d'une MADA.	25
Figure II.2 : Modes de fonctionnement de la MADA	26
Figure II.3 : Représentation spatiale de la MADA.....	27
Figure II.4 : Passage d'un système triphasé à un système biphasé.....	29
Figure II.5 : Structure de l'onduleur à trois niveaux de types N.P.C.	32
Figure II.6 : Interrupteur bidirectionnel équivalent à la paire transistor-diode.....	33
Figure II.7 : structure d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure N.P.C.....	33
Figure II.8 : Différentes configurations d'un bras d'onduleur	34
Figure II.9 : Les trois positions de l'interrupteur.	34
Figure II.10 : Les différentes stratégies M.L.I.....	38
Figure II.12 : Les deux porteuses et les trois signaux de référence de l'onduleur triphasé à trois niveaux.	41

Figures II.13 : Tensions de sortie de l'onduleur N.P.C triphasé à trois niveaux pour $m=15$ à gauche et pour $m=27$ à droite.....	42
Figure II.14 : Rang d'harmonique pour $m=15$ à gauche et pour $m=27$ à droite.....	42
Figure II.16 : Variation de l'amplitude du fondamental et le taux d'harmonique pour $m=15$	43
Figure III.1 Principe général de la commande vectorielle en puissances active et réactive rotorique de la MADA.....	45
Figure III.2: Orientation de flux.....	45
Figure III.3: Les tensions de commande.....	47
Figure III.4: Bloc de génération des courants de références.....	48
Figure III.5: schéma bloc de la structure de commande de la MADA alimentée en tension.....	49
Figure III.6: schéma bloc de la régulation de courant rotorique(i_{dr}).....	50
Figure III.7: Le schéma bloc global de la structure de commande de la MADA alimentée en tension.....	51
Figure III.7 : Résultats de simulation de la commande vectorielle en P et Q (a,b,c,d,e,f,g) de la MADA.....	54
Figure IV.1 Redresseur de courant triphasé à M.L.I à trois niveaux à structure N.P.C.....	56
Figure (IV.2) : Représentation de Fresnel du circuit du réseau.....	58
Figures (IV.3) : Tensions et courants de sortie du redresseur triphasé à trois niveaux (a,b,c,d,e,f,g) avec ($C1 = C2 = 10mF$ et $R_{ch} = 25\Omega$) à gauche et ($C1 = C2 = 20mF$ et $R_{ch} = 25\Omega$) à droite.....	60
Figure IV.4 : Cascade d'un Redresseur de courant triphasé à trois niveaux-Onduleur de tension triphasé-MADA-Turbine.....	61
Figure IV.5 : Filtre intermédiaire de la cascade redresseur de courant triphasé à trois niveaux-onduleur triphasé à trois niveaux et son graphe informationnel.....	62
Figure IV.6 : Schéma du principe de contrôle des courants de réseau.....	63
Figure IV.7 : Schéma global du contrôle de la liaison au réseau.....	64
Figure IV.8 : Profil du vent appliqué et vitesse de rotation du rotor.....	65
Figure IV.9.a Résultats de simulation de la cascade complète (a,b,c,d,e) avec $Q_{rref} = 0$	67
Figure IV.9.b : Résultats de simulation de la cascade complète (a,b,c,d,e) avec $Q_{rref} \neq 0$	69
Figure V.1 : Schéma du système éolien avec filtrage par la MADA.....	72
Figure V.2: Schéma de principe du filtrage actif avec la MADA.....	72
Figure(V.3) : Méthode des puissances réelle et imaginaire en utilisant la transformation de Park.....	74
Figure(V.4) : Schéma de principe de filtrage actif par convertisseur côté réseau.....	76
Figure V.5 : La boucle de régulation des courants avec les références harmoniques.....	76
Figure I.16 Profil du vent imposé et vitesse de rotation de la machine.....	77
Figure V.5: Déséquilibre de la charge.....	81
Figure V.6: Résultats de simulation de filtrage du déséquilibre d'une charge linéaire (a,b,c,d,e,f).....	83

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est un élément indispensable et une forme d'énergie dont on ne peut se passer, sa production et sa disponibilité préoccupent les autorités responsables du secteur électrique. Cependant, vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies, la multiplication des appareils domestiques de plus en plus gourmands en consommation d'énergie électrique, la demande de l'énergie en sujet devient très importante. Face à cela et avec la diminution du stock mondiale des hydrocarbures et surtout la crainte d'une pollution envahissante et destructive pour l'environnement, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergies nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement.

L'énergie éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes, mais pour palier à l'amortissement de la demande d'électricité qui ne cesse d'augmenter. Plusieurs pays se sont, aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne, en particulier, ceux là où le souffle du vent disponible une grande partie dans l'année. La caractéristique principale de l'énergie éolienne est qu'elle est fluctuante et variable car la vitesse du vent n'est pas constante. Le secteur éolien fait appel donc à des machines électriques fonctionnant à vitesses variables, ces entraînements exigent pour ces machines de hautes performances, une fiabilité accrue et un coût réduit.

Ce mémoire est basé sur l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA), pilotée à travers les grandeurs rotoriques, intégrée dans un système éolien. Il est constitué d'une introduction générale, cinq chapitres, une conclusion générale et une bibliographie.

Le premier chapitre est basé sur des rappels sur les systèmes éoliens, la modélisation mathématique du système de conversion de l'énergie éolienne. On termine ce chapitre par application d'une technique d'extraction de maximum de puissance appelée « MPPT ».

Le deuxième chapitre est divisé en deux parties : La première est consacrée pour la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de la commander, la seconde partie relative à la modélisation de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C, destiné à alimenter la MADA.

Le troisième chapitre consiste à l'application de la commande vectorielle en puissance active et réactive rotoriques à la machine, alimentée par une source triphasée et son rotor est connecté à un onduleur triphasé à trois niveaux, commandé en tension par la stratégie triangulo-sinusoïdale. L'onduleur est alimenté par une source continue supposée constante.

Le quatrième chapitre abordera l'étude de la cascade complète constituée d'un Redresseur triphasé à trois niveaux-Onduleur triphasé à trois niveaux-MADA-Turbine.

Le dernier chapitre intitulé « Filtrage actif par l'éolienne », présentera une technique de filtrage des harmoniques de courant à l'aide du système éolien.

On termine ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre I :
Etat de l'art sur les Eoliennes

I.1 : Historique

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 2 000 ans avant J.-C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite d'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 moulinier le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés.

Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poule La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Cette application a évolué en termes de puissance et de rendement durant tout le 20^{ème} siècle et jusqu'au début du 21^{ème}. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique [2].

En 2006, l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [5].

I.2 : Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer, c'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité, plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones.

Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

I.3 : Quelques notions sur le vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire.

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

Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au tableau I.1 [3].

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (N/m ²)
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

Tableau I.1 : échelle Beaufort [3].

I.4 : Différents types d'éoliennes

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il y'a deux (02) grandes familles d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

I.4.1 : Eolienne 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. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation à savoir l'éolienne de **Savonius** et celle de **Darrieus**.



Figure I.1 : Eolienne à axe vertical

I.4.2 : Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent, elles sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation.



Figure I.2: Eolienne à axe horizontal

On distingue deux types d'éoliennes à axe horizontal : éoliennes lentes et éoliennes rapides.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. 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. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau.

La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [3]:

$$P = 0.15 D^2 V^3$$

La puissance étant exprimée en Watt, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.

Les éoliennes rapides 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 (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer

difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

Le tableau I.3 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 Kw
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW

Tableau I.3 : classification des turbines éoliennes [3]

En effet, les éoliennes ont différentes dimensions, et puisque l'air est une ressource diffuse, la tendance générale favorise les appareils de plus en plus gros. Les progrès en science des matériaux ont permis la fabrication de pales plus légères et plus solides ainsi que l'amélioration de la conception des tours et des fondations, ce qui permet la construction d'appareils de plus en plus imposants. En 1995, les éoliennes de 500 kW étaient la dernière nouveauté.

La formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen [1] :

$$P = 0.2 D^2 V^3$$

Dans ce qui suit, notre étude se portera spécialement sur les éoliennes rapides dont nous essayerons de donner une description globale du modèle.

I. 5. Différentes parties d'un aérogénérateur

Une éolienne rapide est constituée principalement de trois parties : les pales (entre 1 et 3), la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

➤ Le mat

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La tour à une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur sont disposés 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.

A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500kW à une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance.

➤ Les pales

Les pales permettent de capter la puissance du vent et elles sont des pièces techniquement difficile à réaliser car elles doivent obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais, elles doivent aussi être fabriquées avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air. Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante.

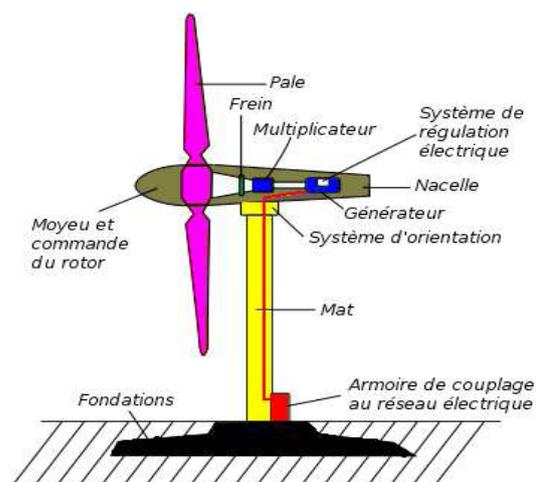


Figure I.3 : Constitution d'une éolienne

➤ La fondation

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

➤ La nacelle

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne (Figure I.4).

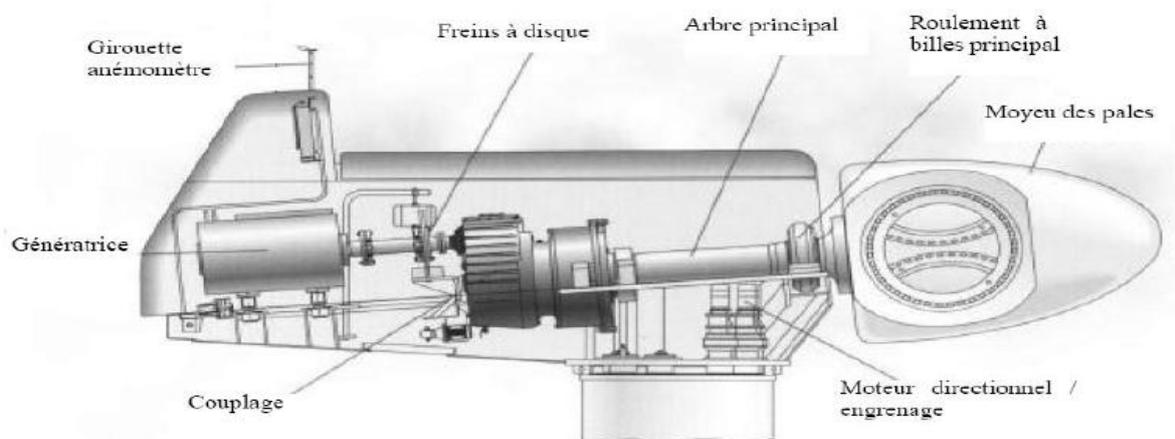


Figure I.4 : La nacelle.

➤ **Le multiplicateur**

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

➤ **la génératrice**

La fonction première de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines: une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone. De plus un convertisseur de puissance associe éventuellement à la génératrice selon le type (direct ou indirect) de connexion au réseau.

➤ **L'arbre lent**

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

➤ **L'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 atteint approximativement le seuil. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à la vitesse maximale pour assurer la protection de l'éolienne.

➤ **Le système de control-commande**

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation, à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne, le signal est transmis de l'ordinateur vers l'opérateur via un modem téléphonique.

➤ **Le rotor**

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59% (limite de Betz).

➤ **Le moyeu**

C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.

I.6 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une éolienne peut s'annoncer comme suite :

A la hauteur de la nacelle souffle un vent à la vitesse V_{vent} , tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt.

A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolienne et commence à tourner. Une puissance P_{vent} est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine [4].

La puissance cinétique du vent qui traverse un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{vent}^3 \quad (I.1)$$

R : Longueur de la pale (m)

ρ : Masse volumique de l'air ($1,25 \frac{kg}{m^3}$ atmosphère normale)

V_{vent} : Vitesse du vent ($\frac{m}{s}$)

Cette puissance ne peut être totalement captée, cela veut dire que la vitesse du vent est nulle en aval des pales, on exprime alors la puissance captée par une éolienne :

$$P_{cap} = C_p(\lambda) P_{vent} \quad (I.2)$$

C_p : Le coefficient de performance ou coefficient de puissance, il représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce coefficient ne peut dépasser la valeur limite, appelée limite de Betz qui est $16/27$ soit $0,5926$, c'est cette valeur qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée [4]. 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 [6].

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (I.3)$$

Où Ω_t en (rad/s) est la vitesse du rotor à faible vitesse, sachant que la vitesse Ω_r du rotor de la génératrice est liée à celle du rotor lent par :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{G} \quad (I.4)$$

Où G représente le rapport des vitesses du multiplicateur. On peut donc exprimer le rapport λ en fonction de la vitesse de la machine par :

$$C_p = \frac{P_{cap}}{\frac{1}{2} \rho S_t V^3} \quad (I.5)$$

$S_t = \pi R^2$: Surface balayée par les pales.

L'allure de la variation du C_p en fonction du rapport de vitesse est illustrée sur la figure I.7.

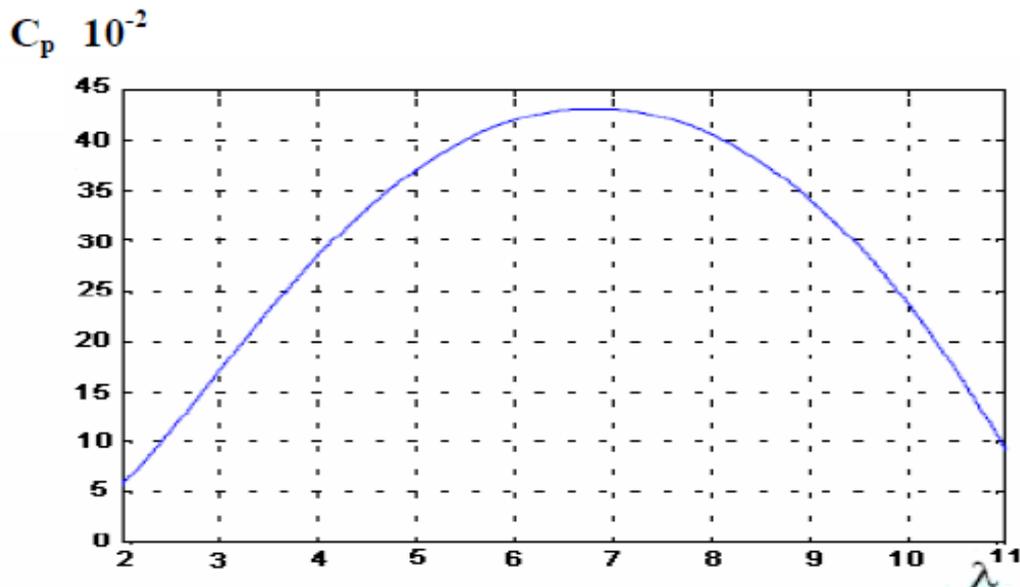


Figure I.5 : Variation du C_p en fonction du rapport de vitesse

I.7 Puissance susceptible d'être recueillie par les pales : Théorème de Betz

La figure I.6 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur V . Le vecteur V_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée V_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force F_{res} qui se décompose en une poussée axiale F_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation F_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse du vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale. β et i sont respectivement l'angle de calage et l'angle d'incidence [4].

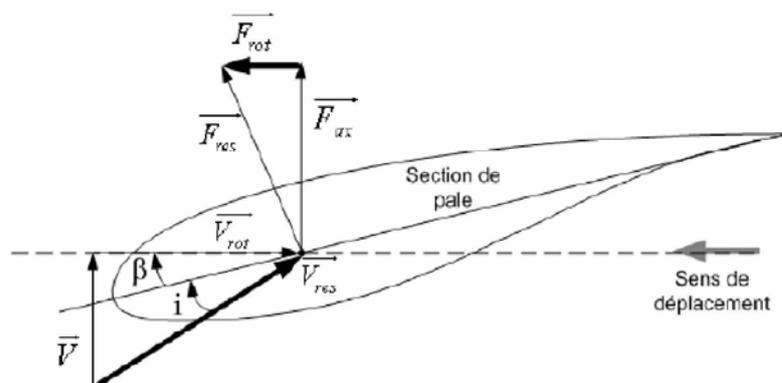


Figure I.6: Bilan des forces

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz. Il suppose que les pales sont placées dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 .

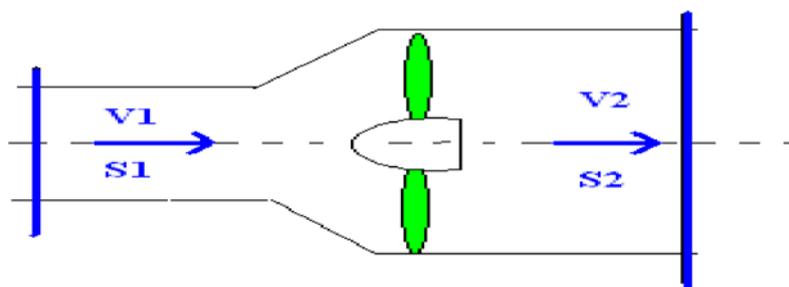


Figure I.7: théorie de Betz

La production d'énergie ne peut se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine fluide traverse les pales en s'élargissant.

Désignons par V , la vitesse de l'air qui traverse l'aéromoteur et par S la surface balayée par les pales. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 = VS \tag{I.8}$$

Par ailleurs d'après le théorème d'Euler, la force exercée par les pales sur l'air en mouvement est dirigée vers l'avant et égale en valeur absolue à :

$$F_{rot} = \rho Q (V_1 - V_2) = \rho S V (V_1 - V_2) \tag{I.9}$$

Et la puissance développée par la force F_{rot} (c'est-à-dire par l'aéromoteur) dont le point d'application se déplace à la vitesse V par rapport aux molécules d'air en mouvement est :

$$P = F_{rot} V = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \tag{I.10}$$

Sachant que la puissance absorbée par l'aéromoteur est égale à la variation de l'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse l'éolienne :

$$\Delta T = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (I.11)$$

On en tire:

$$V = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (I.12)$$

On remplaçant (I.12) dans (I.10), on trouve que la puissance est maximale pour :

$$V_2 = \frac{V_1}{3}$$

Et en rapportant cette valeur particulière de V_2 dans l'expression de P on obtient ainsi la puissance maximale susceptible d'être recueillie par les pales :

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.13)$$

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

$$\frac{P}{P_{\max}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right) \left(1 - \frac{V_2^2}{V_1^2} \right)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que le ratio P/P_{\max} 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 du vent donnée.

Cette relation 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 I.8 [5].

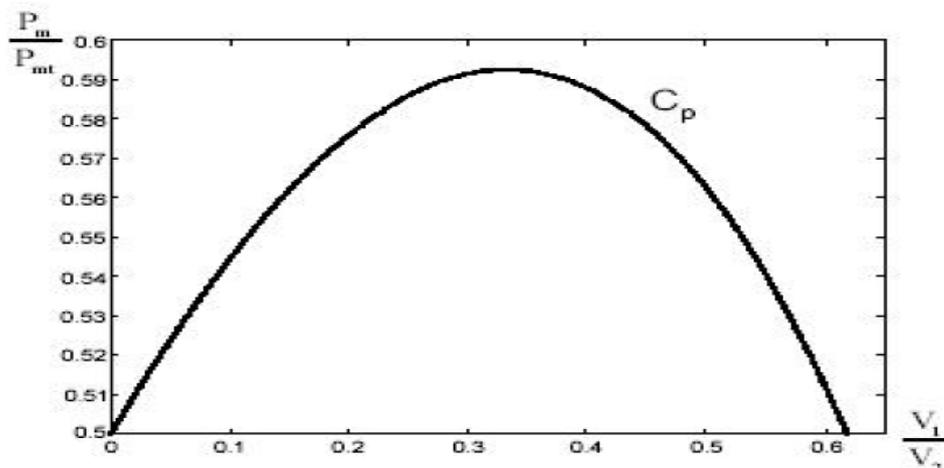


Figure I.8 : Coefficient de puissance

I.8 Modélisation Turbine-Arbre-Multiplicateur

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie, le coefficient de frottement et l'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine (figures I.9). La puissance de sortie est donnée par l'équation suivante :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (I.17)$$

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 * \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3\beta - C_4\right) \exp\left(-\frac{C_5}{\lambda_1}\right) + C_6\lambda \quad (I.18)$$

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$$C_1 = 0.5176; C_2 = 116; C_3 = 0.4; C_4 = 5; C_5 = 21; C_6 = 0.0068.$$

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure 1-10. La valeur maximale de C_p ($C_{pmax} = 0.48$) est atteinte pour $\beta = 0^\circ$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale λ_{nom} [5].

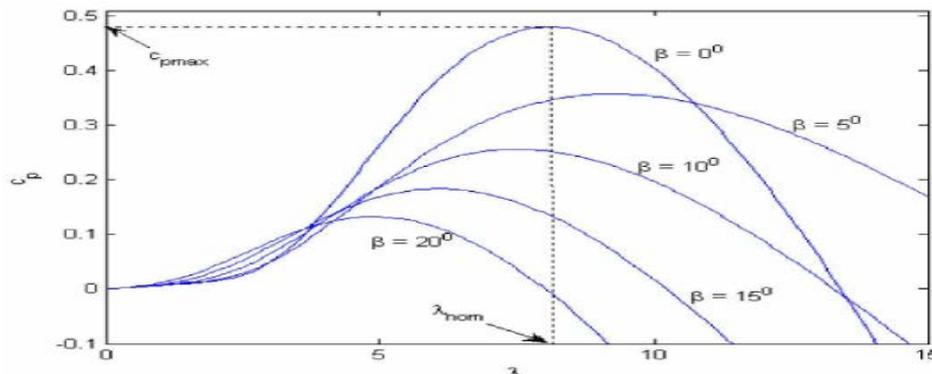


Figure I.9 : Influence de λ sur le coefficient de puissance

I.8.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice. Ce multiplicateur est considéré parfait, donc il se réduit à un simple gain de vitesse G .

Par le principe de conservation de puissance mécanique échangée entre la turbine et la génératrice à travers le multiplicateur de vitesse, on le modélise mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (I.19)$$

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_{turbine} \quad (I.20)$$

I.8.2 Modèle de l'arbre

Par le principe de conservation de l'énergie cinétique de rotation échangée via le multiplicateur de vitesse, entre le rotor de la turbine et le rotor de génératrice, l'inertie totale peut s'écrire sous la forme :

$$J = \frac{J_{\text{turbine}}}{G^2} + J_g \quad (\text{I.21})$$

$$J \cdot \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = C_{\text{mec}} \quad (\text{I.22})$$

Le couple mécanique C_{mec} prend en compte le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple de frottement visqueux C_{vis} et le couple moteur issu du multiplicateur C_g . (Figure I.10)

$$C_{\text{mec}} = C_g - C_{\text{em}} - C_{\text{vis}} \quad (\text{I.23})$$

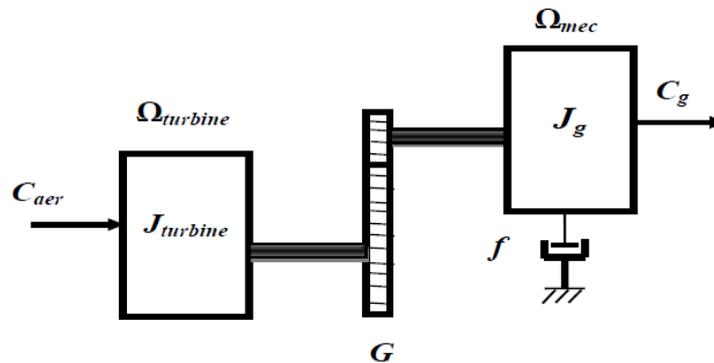


Figure I.10 : Modèle simplifié de la turbine

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement visqueux f :

$$C_{\text{vis}} = f \cdot \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{I.24})$$

I.8.3 Schéma bloc du modèle de la turbine

Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales et la vitesse de rotation de la turbine. Cette dernière génère le couple aérodynamique à appliquer au multiplicateur qui transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de turbine mécanique et couple de multiplicateur. Le modèle décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a deux entrées qui sont le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique opposé par la génératrice.

Le schéma bloc, figure(I.11) nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée, par action sur l'angle de calage des pales et sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

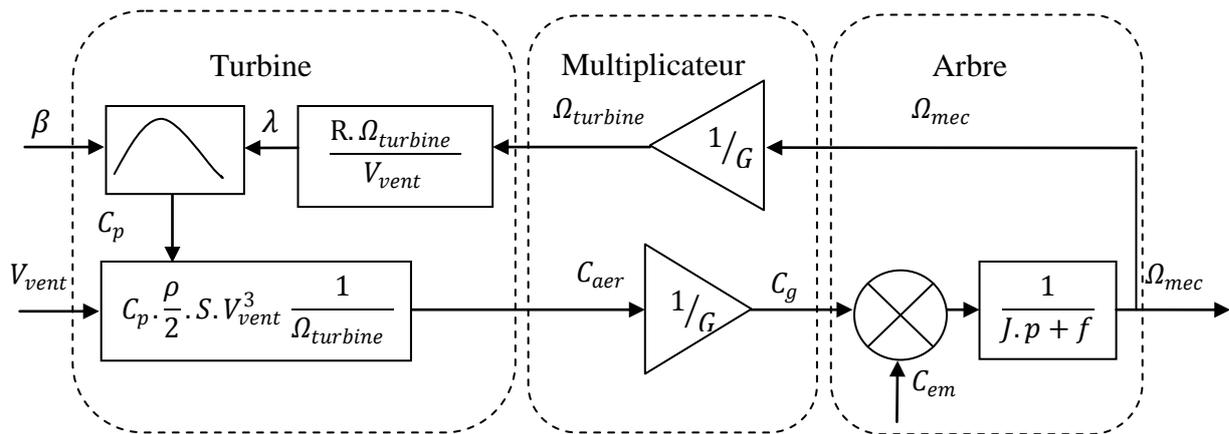


Figure. I.11 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne

I.9 Stratégies de commande de la turbine éolienne

I.9.1 Extraction du maximum de puissance « MPPT »

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Dans cette partie, nous présentons une stratégie pour contrôler le couple électromagnétique et indirectement la puissance électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance générée. On distingue deux familles de structure de commande [30] :

- Stratégie de commande avec asservissement de vitesse mécanique ;
- Stratégie de commande sans asservissement de vitesse mécanique ;

La plupart des éoliennes sont contrôlées par la seconde stratégie, par ce qu'en pratique, la mesure de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons [30] :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui engendre des erreurs sur la mesure de la vitesse du vent.
- Le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure local de vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

De ce fait, nous nous limitons ici uniquement à la stratégie de commande sans asservissement de vitesse. Cette stratégie de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I.25)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul et en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_{vis} = 0$), on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (I.26)$$

Le couple électromagnétique de référence (réglage) est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-est}}{G} \quad (I.27)$$

Le couple aérodynamique peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique :

$$C_{aer-est} = C_{p-max} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-est}} \cdot V_{vent-est}^3 \quad (I.28)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine-est}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I.29)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{vent-est} = \frac{\Omega_{turbine-est} \cdot R}{\lambda_{opt}} \quad (I.30)$$

En regroupant ces quatre équations, on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (I.31)$$

L'expression du couple de référence est alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice.

Tel que :

$$C_{em-ref} = A \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (I.32)$$

$$A = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{1}{G^3} \quad (I.33)$$

Le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesses est le suivant :

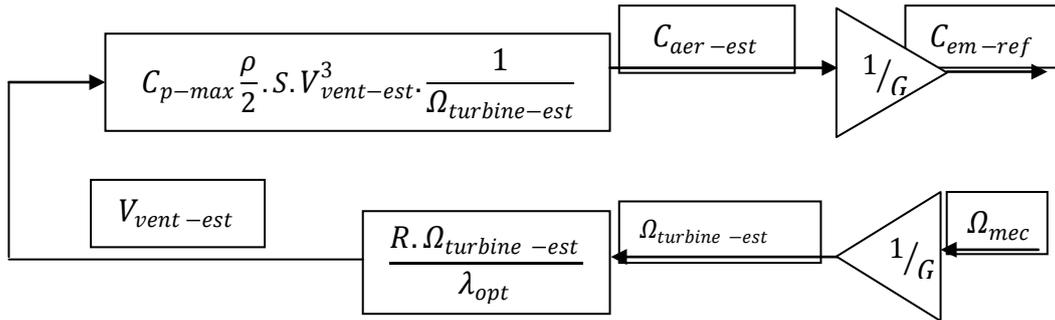


Figure. I.12 : Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite

I.9.2 Schéma bloc de la turbine avec MPPT

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine avec MPPT se déduit à partir des équations précédentes, qui sont représentées sur la figure (I.13).

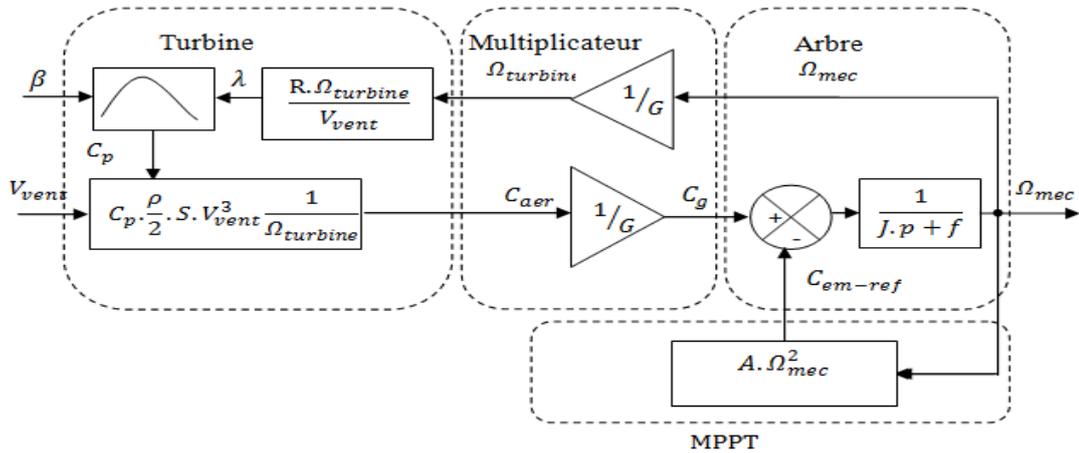


Figure. I.13 : Schéma bloc fonctionnel de la turbine avec MPPT

I.9.3 Différentes phases de fonctionnement

Il y a quatre phases (zones) de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

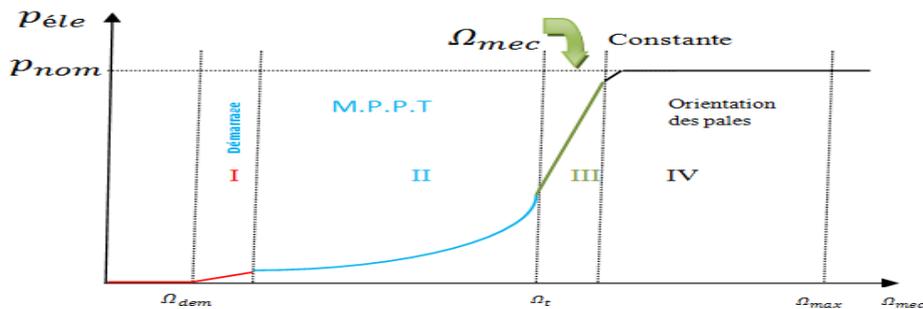


Figure I.14: les quatre zones de fonctionnement de la turbine

➤ La phase de démarrage

La production d'énergie électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice. La puissance électrique reste assez faible.

➤ La phase d'extraction de la puissance maximale (phase M.P.P.T)

Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale de la génératrice. La puissance électrique augmente rapidement. Dans cette zone, l'angle de calage des pales β est maintenu constant à sa valeur nominale afin d'obtenir un C_p maximal. La puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de la vitesse mécanique et pour des vitesses de vent moyennes.

➤ Phase à vitesse mécanique quasi constante

L'angle de calage des pales β varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs de vent : c'est le pitch control. La puissance électrique augmente jusqu'à sa vitesse nominale.

➤ Phase à puissance constante

Lorsque la vitesse du vent augmente encore, l'angle de calage des pales devient important afin de conserver la puissance électrique constante et nominale. Par sécurité, si la vitesse du vent devient très importante, il y a 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 devient moins importante [7].

Le système d'orientation des pales à une dynamique mécanique bien plus lente que la dynamique électrique de la génératrice. Ainsi la lenteur de la régulation de l'angle de calage peut entraîner un dépassement de la vitesse de rotation limite lors d'une rafale de vent se produisant pendant un fonctionnement en zone III. Il est dans ce cas intéressant de concevoir une procédure permettant d'anticiper l'action du dispositif d'orientation en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation [4].

I.9.4 Système d'orientation des pales

Les éoliennes à vitesse variable utilisent un système d'orientation des pales. Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé 'pitch control'. En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus exactement le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes vitesses de vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position en drapeau à vitesse maximale [4].

Afin d'obtenir un système de conversion d'énergie le plus efficace possible, l'angle de calage des pales β est adapté en permanence afin de maximiser le rendement de l'hélice. Le système de régulation de puissance par orientation des pales possède les avantages suivants :

- Il permet d'effectuer un contrôle actif de puissance pour de larges variations de vitesse de vent (bien sur en dessous de la limite de sécurité) ;
- Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage Stall pour la plage de fonctionnement correspondante aux fortes vitesses de vent ;
- Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants ;
- Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grandes vitesses.

L'entrée de commande du système d'orientation des pales est la puissance électrique mesurée :

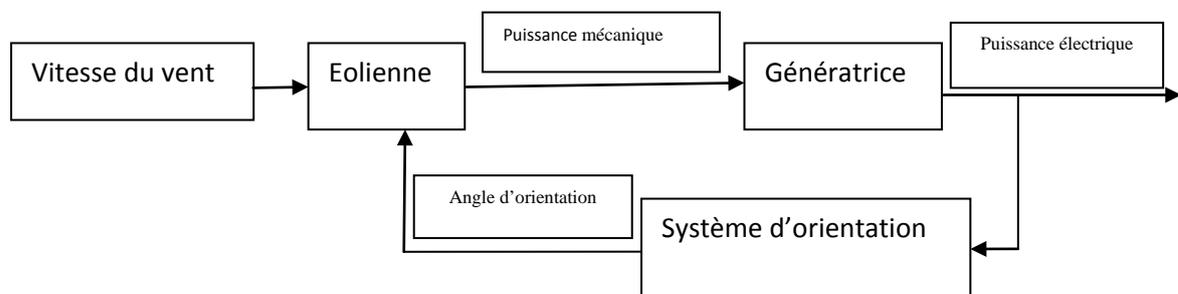


Figure. I.15 : Schéma bloc de système d'orientation des pales

I.7.5 Simulation de la turbine éolienne

Les paramètres de la turbine simulée sont donnés dans l'annexe I.

Résultats de simulation

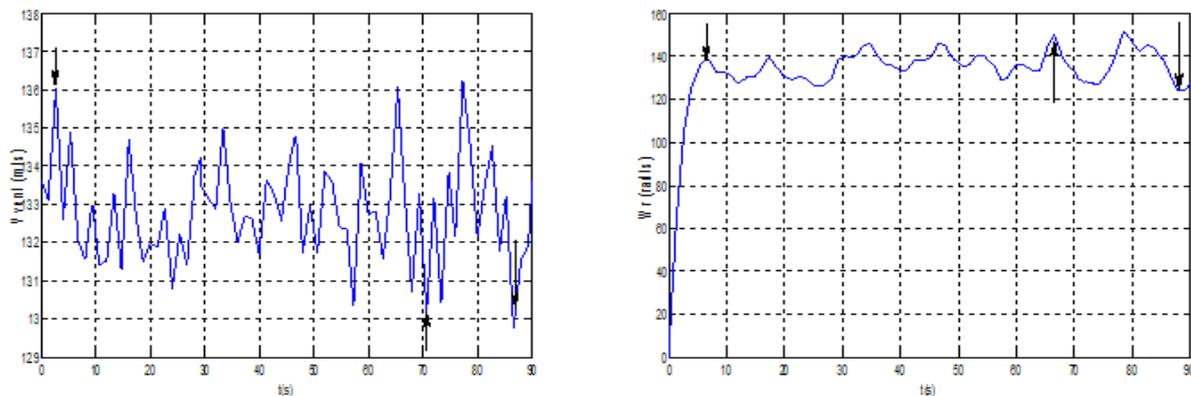


Figure I.16 : Résultat de simulation de la turbine éolienne

D'après les résultats obtenus, on constate que la vitesse du rotor suit bien les variations de la vitesse du vent.

I.10 Raccordement au réseau

L'éolienne est raccordée au réseau suivant deux types de raccordement direct ou indirect :

Raccordement direct

➤ Système de base

C'est une configuration dite traditionnelle figure (I.23), utilisée le plus souvent avec une machine asynchrone à cage d'écureuil. Dans ce cas, sa vitesse de rotation sera imposée par la fréquence du réseau (à vitesse fixe), le fonctionnement en génératrice est obtenu lorsque la machine asynchrone tourne à une vitesse supérieure à celle du synchronisme : la machine génère de la puissance active mais prélève de la puissance réactive pour sa magnétisation [8].

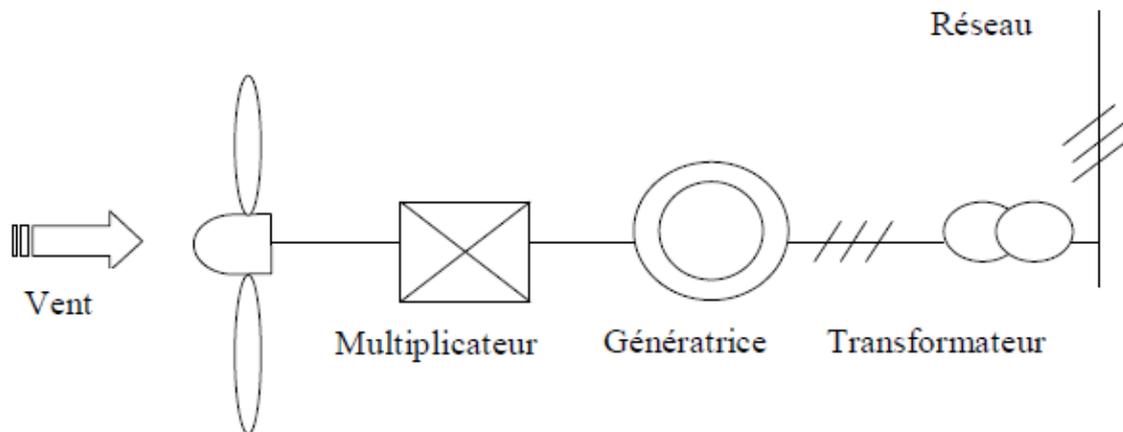


Figure I.17 : Exemple de connexion directe au réseau

➤ Machine à double alimentation

Cette configuration contient un générateur asynchrone doublement alimentée figure (I.24). Un convertisseur de fréquence commande directement les courants dans les enroulements du rotor. Ceci permet de contrôler la puissance de sortie du générateur en utilisant des convertisseurs dimensionnés à environ 20% de la puissance nominale du

générateur.

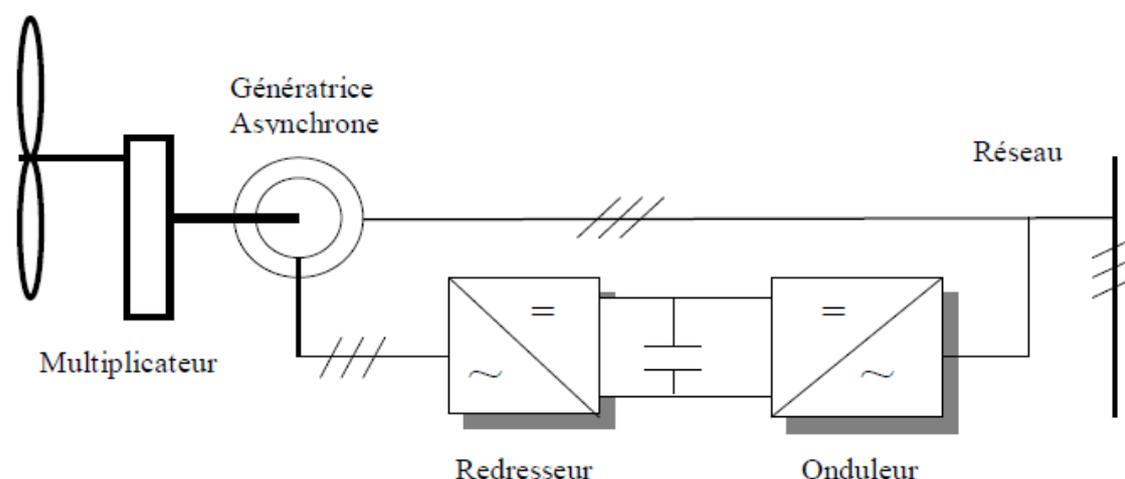


Figure I.18 : Eolienne basée sur une machine asynchrone à double Alimentation

Raccordement indirect

L'introduction de convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable, ce qui signifie que l'éolienne produit du courant alternatif exactement à la même fréquence variable que celle s'appliquant au stator [8].

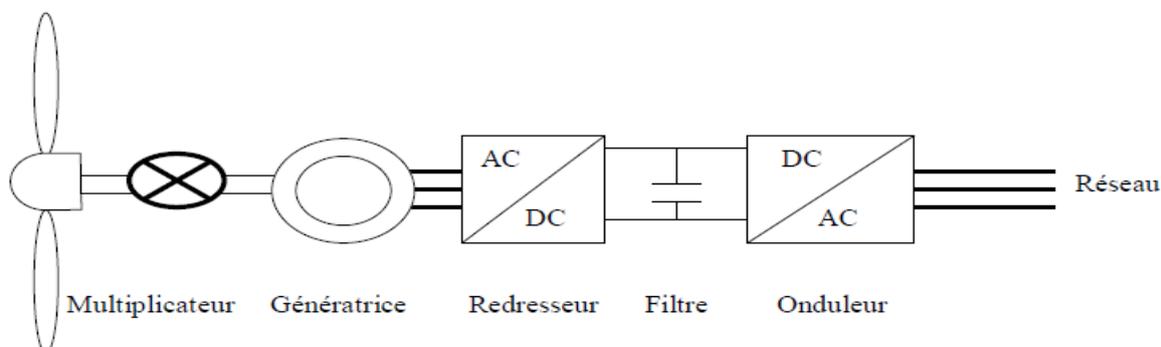


Figure I.19 : Exemple de connexion indirecte au réseau

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine. Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques.

Une technique d'extraction de la puissance maximale appelée MPPT (Maximum Power Point Traking) a été présentée et détaillée en vue d'une production maximale d'énergie électrique quelque soit la vitesse du vent. Une simulation d'une turbine éolienne a été également réalisée et les résultats de simulation confirment la suite de la vitesse du rotor à celle du vent.

Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants.

Dans ce qui suit, nous allons étudier les générateurs les plus utilisés dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment les génératrices asynchrones et en particulier la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

Chapitre II :
Modélisation de la MADA et l'onduleur triphasé
à trois niveaux

II.1 Modélisation de la MADA

Introduction

Notre but c'est de chercher un type de génératrice qui nous permettra de commander indépendamment des puissances actives et réactives.

Donc nous nous orientons vers le choix d'une machine asynchrone à double alimentation afin de permettre une production optimale d'électricité quel que soient les conditions du vent et la vitesse de l'éolienne, car cette machine présente des avantages de par son contrôle et son fonctionnement pour la production d'électricité, en plus son prix compétitif et de sa grande robustesse lui confère une bonne place dans les systèmes éoliens. De plus la MADA permet d'avoir une plage de vitesse variante $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme [21].

Le principal avantage de la MADA est que l'équipement d'électronique de puissance transporte uniquement une fraction de la puissance totale (20-30%), cela signifie que les pertes dans les convertisseurs d'électronique de puissance, ainsi que les coûts sont réduits. Un tel système convertit la tension variable générée à la tension et fréquence fixes. En outre, il maintient le facteur de puissance du système total, près de l'unité à toutes les conditions de vitesse du vent. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important [23].

II.1.1 Description du fonctionnement de la MADA

II.1.1.1 Structure de la machine

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator identique à celui des machines triphasées classiques (Machine asynchrone à cage et machine synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. Mais le rotor est radicalement différent car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la figure (II.1) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais-bagues collectrices) permettant d'avoir l'accès aux tensions et courants rotoriques [21], [22].

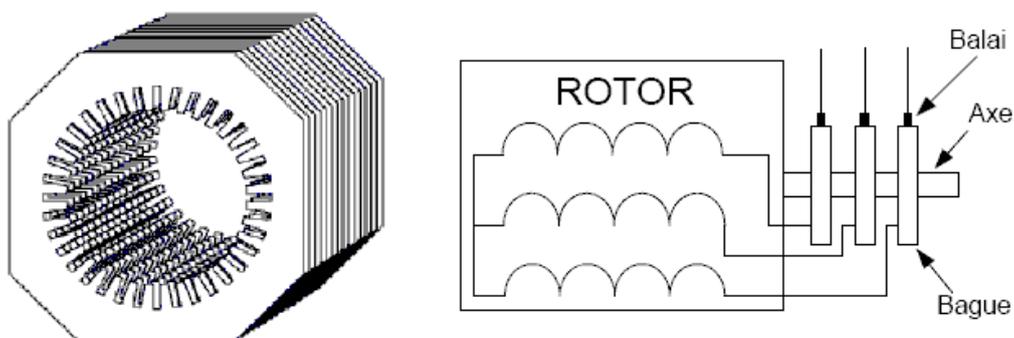


Figure II.1 : Structure du stator et contacts glissants d'une MADA.

II.1.1.2 Modes de fonctionnement de la MADA

On peut fonctionner la MADA en moteur ou en générateur comme les machines asynchrones classiques, mais la grande différence, pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [23].

Ainsi, le fonctionnement de la MADA se base sur le principe de contrôle de l'écoulement de puissance de glissement [13]. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique, on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_r est égale à g fois la fréquence du réseau. Durant des années, cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machines [22]. Avec l'apparition des semi-conducteurs, une solution plus pratique a été mise au point : Une interface électronique composée d'un redresseur et d'un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau.

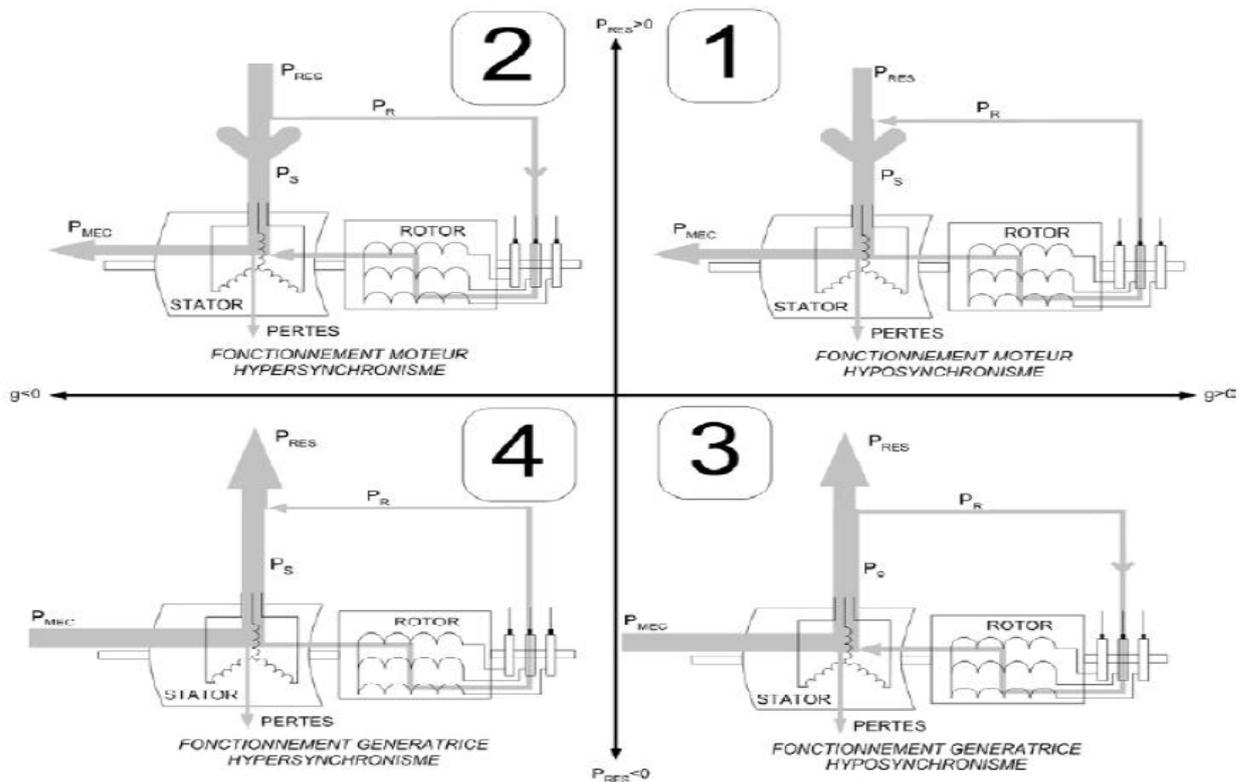


Figure II.2 : Modes de fonctionnement de la MADA

➤ Cas moteur

La machine fonctionne en moteur hypo-synchrone si la vitesse de rotation est inférieure à la vitesse de synchronisme ainsi la puissance de glissement est réinjectée au réseau (quadrant 1). Dans le cas contraire où le sens d'écoulement de la puissance rotorique est inversé, la vitesse de rotation est supérieure à celle de synchronisme et la machine fonctionne en moteur hyper-synchrone (Quadrant 2).

➤ **Cas générateur**

La machine fonctionne en générateur hypo-synchrone si une partie de la puissance produite par le stator est absorbée par le rotor, et la vitesse de rotation est inférieure à la vitesse de synchronisme (quadrant 3). Et si on entraîne le rotor à une vitesse supérieure à celle de synchronisme, la machine fonctionnera en générateur hyper-synchrone, ainsi, la puissance fournie au réseau est égale à la puissance statorique plus la puissance de glissement récupérée du rotor (quadrant 4).

II.1.2 Modélisation de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation dont nous allons étudier la mise en équations correspond à la structure de principe représenté sur la figure II.6 dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, en hypothèse bipolaire [27].

Donc, on modélise la MADA en tenant compte de la répartition de ses enroulements, sa géométrie réelle est une tâche très complexe. Il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices [25].

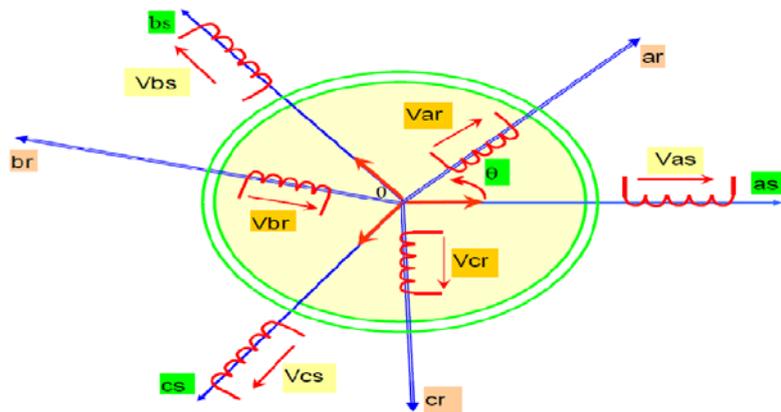


Figure II.3 : Représentation spatiale de la MADA.

V_{sa}, V_{sb} et V_{sc} : les tensions simples statorique.

V_{ra}, V_{rb} et V_{rc} : les tensions simples rotoriques.

II.1.2.1 Hypothèses simplificatrices

On adopte les hypothèses simplificatrices suivantes [27], [26].

- On suppose que le circuit magnétique non saturé et parfaitement feuilleté.
- La constitution de la machine est symétrique.
- On ne considère que le premier harmonique d'espace de la distribution de forces magnétomotrices, créées par chaque phase du stator et du rotor.
- Les pertes par hystérésis et courant de Foucault sont négligeables.
- Conventions de signes :
 - Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.
 - Une f.e.m positive fait circuler un courant positif.
 - Les angles et les vitesses de rotation sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.

II.1.2.2 Les équations électriques

Sous les hypothèses précédentes, les équations électriques des tensions statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la MADA, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \\ [V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Il est possible d'exprimer les flux en fonction des courants et des différentes inductances propres et mutuelles de la machine par :

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\phi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{sr}][i_s] \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

On remplace (II.2) dans (II.1), et on applique la transformée de Laplace, on aura le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][i_s] + S[L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [V_r] = [R_r][i_r] + S[L_{rr}][i_r] + [M_{sr}][i_s] \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

S : opérateur de Laplace.

II.1.2.3 Equation mécanique

L'équation générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone s'écrit :

$$C_{em} = P [i_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] [i_r]) \quad (II.4)$$

Et l'équation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} + C_r + f_r \Omega \quad (II.5)$$

II.1.3 Modèle de la MADA dans la configuration de Park

La transformation de Park consiste à transformer un système triphasé en un système biphasé simplifié, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaire(o), d'axe direct(d) et d'axe quadrature(q) [18].

Dans ce plan, les inductances mutuelles et propres sont indépendantes de la rotation.

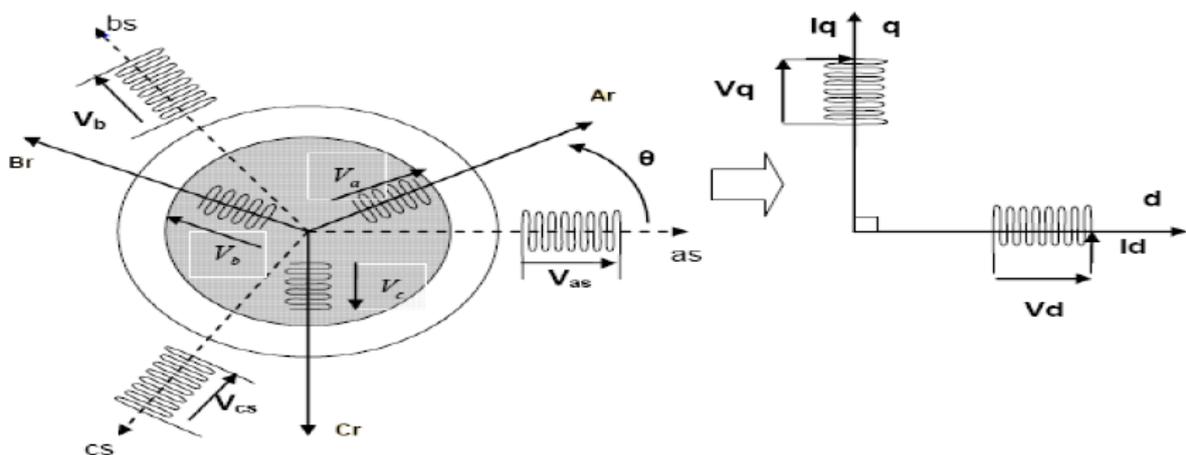


Figure II.4 : Passage d'un système triphasé à un système biphasé.

La matrice de passage de Park s'écrit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

Après les calculs on aura les systèmes d'équations suivants :

Pour les tensions :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Pour les flux :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Tel que :

$L_s = l_s - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$L_r = l_r - M_s$: Inductance cyclique statorique.

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

Avec:
$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d}{dt} \theta_s \\ \omega = \frac{d}{dt} \theta \\ \theta_s = \theta + \theta_r \end{cases}$$

L'expression de couple électromagnétique après l'application de la transformation de Park s'exprime par la relation suivante, [21] :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (i_{qr} \phi_{ds} - i_{dr} \phi_{qs})$$

II.1. 3.1 Modèle de la MADA lié au champ tournant

Pour faciliter la régulation, il faut connaître les grandeurs statoriques et rotoriques dans le régime permanent, et pour étudier l'alimentation des machines à fréquence variable ce qui nous intéresse, nous choisissons un référentiel lié au champ tournant [28].

Ce référentiel est caractérisé par :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} (\theta_s) = \omega_s \\ \frac{d}{dt} (\theta_r) = \omega_r \\ \omega_r = \omega_s - \omega = g \cdot \omega_s \end{cases}$$

Dans ce référentiel, les équations du système (II.6) s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} (\phi_{dr}) - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} (\phi_{qr}) + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Le couple et l'équation mécanique s'écrivent comme suite :

$$\begin{cases} C_{em} = P (i_{qr} \phi_{dr} - i_{dr} \phi_{qr}) \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} + C_r + f_r \Omega \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

II.1.4 Mise sous forme d'équations d'état

Sachant que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est non linéaire, donc pour simplifier la commande de cette dernière il faut représenter son modèle ce forme des équations d'état. Les tensions statoriques et rotoriques sont des variables de contrôle ($[V_{S,dq}], [V_{R,dq}]$). Les flux ainsi les courants rotoriques sont considérés comme des vecteurs d'état ($[\phi_{R,dq}], [i_{R,dq}]$) [29].

Après les calculs (Annexe II), on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \phi_{ds} + \omega_s \phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \phi_{qs} - \omega_s + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot p \omega \phi_{qs} - \beta V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} + \beta \cdot p \omega \phi_{ds} - \beta V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{qr} \\ \frac{d\omega}{dt} = \left[\frac{p \cdot \mu}{J} (\phi_{qs} i_{dr} - \phi_{ds} i_{qr}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} \omega \right] \end{cases}$$

Avec :

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

II.2 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux

Introduction

L'onduleur est un convertisseur statique qui transforme l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. Il en existe plusieurs structures dont chacune correspond à un type d'application bien déterminée en fonction des performances recherchées [34]. Les premiers onduleurs avaient comme objectif de réduire l'amplitude des harmoniques qui nuisent au fonctionnement normal de la machine. En effet, leur présence entraîne des couples pulsatiles indésirables, ainsi que des pertes supplémentaires dans les systèmes électriques. L'apparition de nouveaux composants d'électronique de puissance a permis de développer de nouvelles structures d'une grande performance par rapport aux structures classiques, en l'occurrence, l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C (Neutral Point Clamping).

II.2.1 Structure générale d'un onduleur à trois niveaux

On peut considérer l'onduleur de tension à trois niveaux comme une mise en série de deux onduleurs de tensions à deux niveaux, donc il existe plusieurs structures de l'onduleur triphasé à trois niveaux [30].

Dans le cadre de notre travail, nous présentons une structure de l'onduleur à trois niveaux de type N.P.C comme l'indique la figure (II.5), qui est une nouvelle structure de conversion utilisée pour alimenter, à tension et fréquence variables, des machines à courant alternatif de forte puissance. Cette structure se compose de trois bras symétriques constitué chacun de quatre interrupteurs en série et deux autres en parallèles, plus deux diodes permettant l'obtention de zéro de la tension V_{km} notées DD_{k0} et DD_{k1} . Chaque interrupteur bicommandable « transistor, GTE, IGBT,... » et d'une diode montée en tête bêche [18], [35].

Le point milieu de chaque bras est relié à une tension continue de valeur $U_{c1} + U_{c2}$. Ces deux générateurs ainsi que les diodes DD_{k0} et DD_{k1} se trouvent connectées entre eux en un point fictif 'M'.

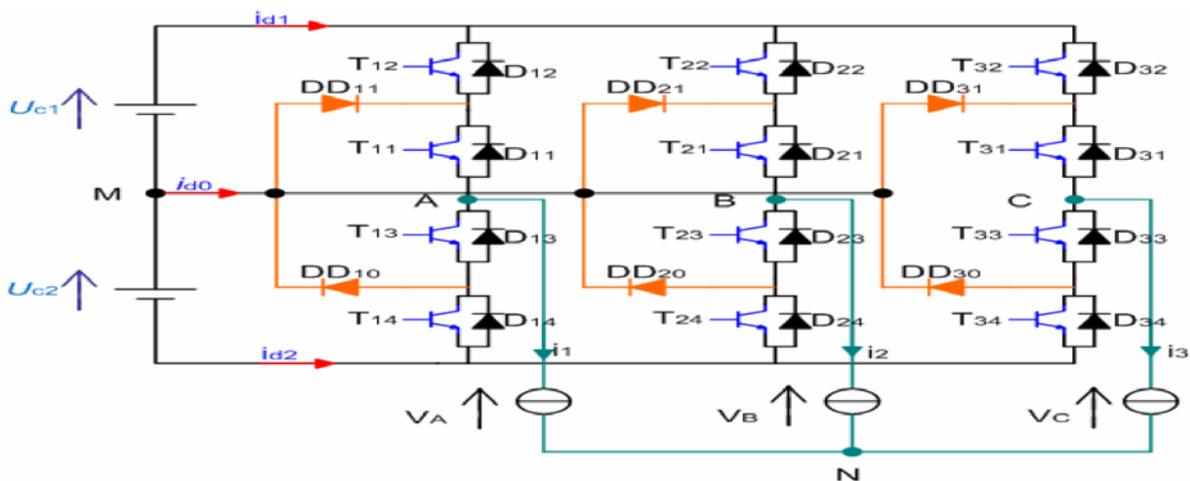


Figure II.5 : Structure de l'onduleur à trois niveaux de types N.P.C.

D'après la représentation schématique de l'onduleur, on considère :

- U_{c1} et U_{c2} sont les tensions d'entrées.
- (V_A, V_B, V_C) et (i_1, i_2, i_3) sont respectivement les tensions et les courants de sorties.

Pour simplifier l'étude et la complexité de la structure de l'onduleur multi-niveaux (trois niveaux), on supposera que [18] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée, c'est-à-dire on néglige l'empiètement anodique.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.

Donc on aura une structure simplifiée, tel qu'on présente chaque paire transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel comme la montre la figure (II.6).

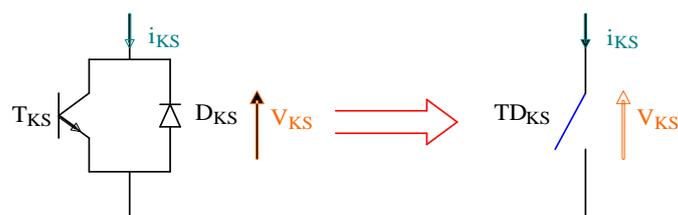


Figure II.6 : Interrupteur bidirectionnel équivalent à la paire transistor-diode

II.2.2 Modélisation du fonctionnement de l'onduleur triphasé à trois niveaux

Vue la symétrie de l'onduleur triphasé à trois niveaux, la modélisation de ce dernier se fait par bras, figure (II.7), et en suite on déduit celle de l'onduleur complet. Et chaque bras est équivalent à un interrupteur à trois positions permettant d'obtenir en sortie trois niveaux de tension U_{c1} , 0 et $-U_{c1}$ [30].

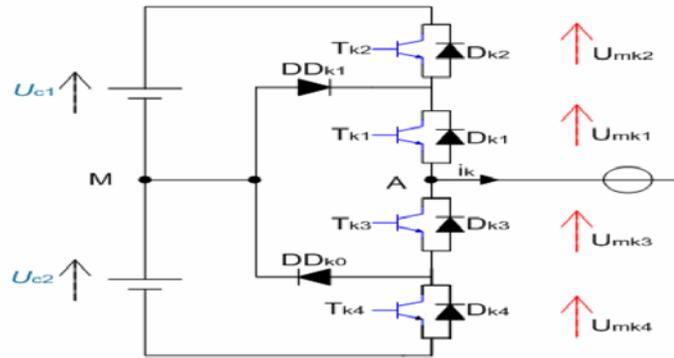


Figure II.7 : structure d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure N.P.C

Remarque

Les tensions U_{c1} et U_{c2} , sont des tensions continues supposées idéales (égales et constantes).

II.2.3 Différentes configurations d'un bras d'onduleur

Une analyse topologique d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux montre qu'il existe cinq configurations possibles, figure (II.8). Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont représentées dans le tableau (II-3) (aves M origine des potentiels et V_{Km} le potentiel du nœud K du bras K). Pour la configuration E_0 le potentiel V_{Km} dépend de la charge de l'onduleur [35].

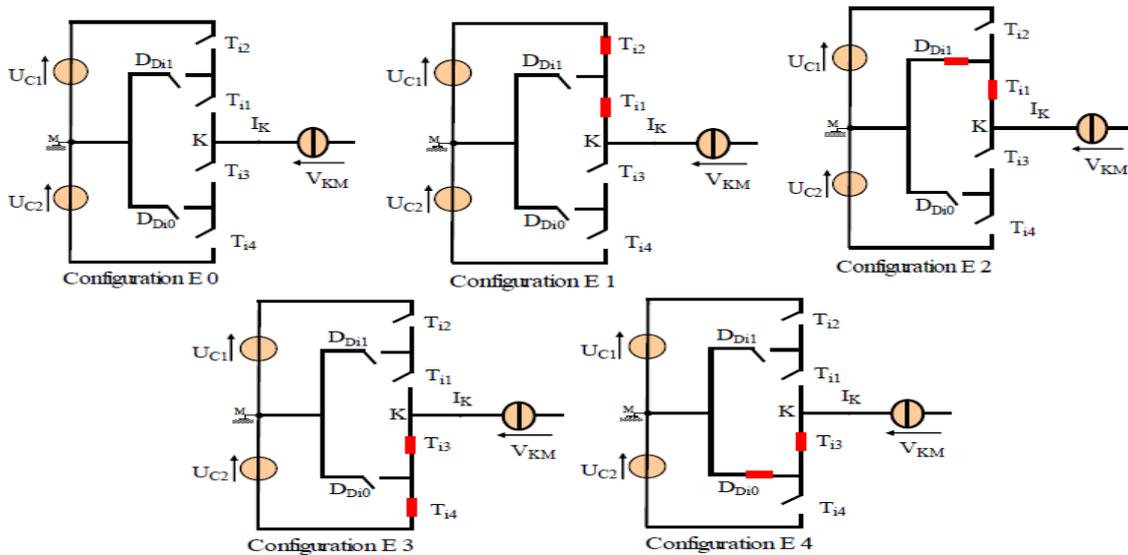


Figure II.8 : Différentes configurations d'un bras d'onduleur

Configuration	Grandeur électrique
E_0	$i_K=0$
E_1	$V_K=U_{c1}$
E_2	$V_K = 0$
E_3	$V_K=-U_{c2}$
E_4	$V_K=0$

Tableau II.3 : Grandeurs électriques pour chacune des configurations d'un bras k.

II.2.4 Fonctionnement d'un bras d'onduleur

L'onduleur triphasé à trois niveaux est constitué de trois bras, chaque bras est équivalent à un interrupteur à trois positions comme l'indique la figure (II.9), permettant d'obtenir en sortie trois niveaux de tension. Au départ, l'interrupteur est à la position M ; la tension de sortie est nulle. Lorsque l'interrupteur passe par les positions 1 et 2, on obtient les niveaux de tension U_{c1} et $-U_{c1}$.

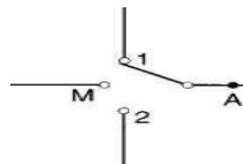


Figure II.9 : Les trois positions de l'interrupteur.

II.3 Modèle de connaissance et de commande de l'onduleur à trois niveaux

II.3.1 Commandabilité des convertisseurs statiques :

Un convertisseur statique est dit en mode commandable si les transitions entre les différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et non plus des commandes internes (grandeurs électriques) [32].

Nous supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée. De ce fait, nous pouvons définir les notions de fonction de connexion et de commutation.

➤ Hypothèses

-La charge est triphasée, couplée en étoile avec neutre isolé :

$$\begin{cases} V_A + V_B + V_C = 0 \\ i_1 + i_2 + i_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

II.3.2 Commande complémentaire d'un onduleur à trois niveaux

Pour éviter les courts-circuits des sources de tensions par conduction des quatre interrupteurs d'un seul bras simultanément, ou une surtension dans le cas de l'ouverture des quatre interrupteurs, on adopte une commande complémentaire des différents semi-conducteurs d'un seul bras, il existe plusieurs commandes complémentaires pour un onduleur à trois niveaux. La commande la plus utilisée est la suivante [18], [32], [33] :

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Avec B_{Ks} est le signal de commande de la base de l'interrupteur TD_{Ks} d'un bras k .

Le tableau II.4 donne l'état d'excitation des interrupteurs d'un seul bras :

B_{K1}	B_{K2}	B_{K3}	B_{K4}	V_K
0	0	1	1	U_{c1}
0	1	0	1	
1	0	1	0	0
1	1	0	0	$-U_{c1}$

Tableau II.4 : Etat d'excitation des interrupteurs d'un seul bras

II.3.3 Fonction de connexion des interrupteurs

Chaque interrupteur on l'associé à une fonction de connexion F_{ki} , tel que cette dernière elle vaut 1 si l'interrupteur (i) est fermé et 0 dans le cas contraire [18].

$$\begin{cases} F_{Ki} = 1 \text{ si } TD_{Ki} \text{ est fermé} \\ F_{Ki} = 0 \text{ si } TD_{Ki} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

En mode commandable, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation suivante [33] :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K3} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Avec, $K=1,2$ ou 3 , représente le numéro de bras.

II.3.4 Fonction de connexion d'un demi-bras

On définit une fonction de connexion du demi-bras, qu'on notera F_{KM}^b avec K indice du bras :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} \cdot F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K4} \cdot F_{K3} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Tel que $b = \begin{cases} 1 & \text{pour le demi-bras du haut} \\ 0 & \text{pour le demi-bras du bas.} \end{cases}$

Les fonctions de connexion F_{KM}^b des trois bras s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11} \cdot F_{12} \\ F_{10}^b = F_{14} \cdot F_{13} \end{cases} ; \begin{cases} F_{21}^b = F_{21} \cdot F_{22} \\ F_{20}^b = F_{24} \cdot F_{23} \end{cases} ; \begin{cases} F_{31}^b = F_{31} \cdot F_{32} \\ F_{30}^b = F_{34} \cdot F_{33} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

❖ Notations

- V_A, V_B, V_C : Tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge.

- V_{AM}, V_{BM}, V_{CM} : Tensions de chaque phase de l'onduleur par rapport au point milieu « M » de l'alimentation continue de l'onduleur.

- V_{NM} : Tension entre le point neutre de la charge (point N) et le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur (point M).

En introduisant ces fonctions dans le système des potentiels des nœuds, on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b \cdot U_{c1} - F_{10}^b \cdot U_{c2} \\ V_{BM} = F_{21}^b \cdot U_{c1} - F_{20}^b \cdot U_{c2} \\ V_{CM} = F_{31}^b \cdot U_{c1} - F_{30}^b \cdot U_{c2} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Les équations des mailles d'un système composé de : source- onduleur-charge donnent :

$$V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} = V_A + V_B + V_C + 3V_{NM} \quad (\text{II.18})$$

Et : ($V_A + V_B + V_C = 0$) car c'est un système triphasé équilibré.

Ce qui donne :

$$V_{NM} = \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad (\text{II.19})$$

Chapitre II : Modélisation de la MADA et l'onduleur triphasé à trois niveaux

Les potentiels des points A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux par rapport au point N s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} V_A = V_{AM} - V_{NM} = \frac{1}{3}(2V_{AM} - V_{BM} - V_{CM}) \\ V_B = V_{BM} - V_{NM} = \frac{1}{3}(-V_{AM} + 2V_{BM} - V_{CM}) \\ V_C = V_{CM} - V_{NM} = \frac{1}{3}(-V_{AM} - V_{BM} + 2V_{CM}) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Après les calculs, les tensions simples peuvent s'écrire sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{30}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \quad (\text{II.21})$$

Pour les courants d'entrée de l'onduleur i_{d1} et i_{d2} peuvent être exprimés en fonction des courants de la charge i_1, i_2, i_3 et les fonctions de connexion d'un demi bras des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Sachant que l'onduleur triphasé à trois niveaux est une association de deux onduleurs à deux niveaux, tel que le courant i_{d1} représente le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux de haut, et i_{d2} représente le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux de bas [31].

Le courant i_{d0} s'exprime en fonction des courants d'entrée et courants de charge par la relation :

$$i_{d0} = F_{11} \cdot F_{13} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{23} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{33} \cdot i_3 \quad (\text{II.23})$$

D'après les relations précédentes, on déduit que le courant i_{d0} s'exprime par la relation suivante :

$$i_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) i_1 + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) i_2 + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) i_3 \quad (\text{II.24})$$

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux le vecteur d'état est : $[U_{c1} \ U_{c2} \ i_1 \ i_2 \ i_3]^t$

et ses entrées internes sont: $[V_A \ V_B \ V_C \ i_{d1} \ i_{d2} \ i_{d0}]^t$.

II.4 Stratégie de commande de l'onduleur à trois niveaux à structure N.P.C

L'évolution technologique dans le domaine des semi-conducteurs a élargi le domaine d'application des techniques de modulation de largeur d'impulsion dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statiques.

Pour générer à la sortie de convertisseur statique une tension très proche de la sinusoïde, on distingue trois différentes stratégies de modulation de largeur d'impulsion [32], qui sont :

- La modulation calculée.
- Commande pleine onde.
- Commande triangulo-sinusoïdale à échantillonnage naturel.
- Modulation vectorielle.

La figure suivante représente un schéma des différentes stratégies de modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

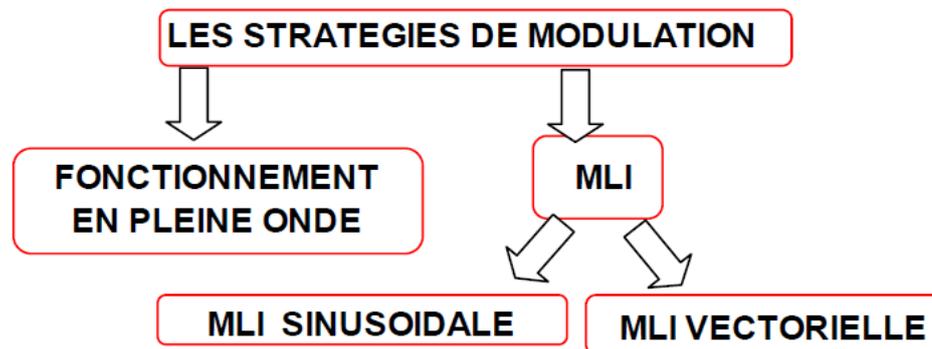


Figure II.10 : Les différentes stratégies M.L.I

Dans notre travail, on va étudier un seul type de stratégie de commande qui est la commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses.

II.4.1 La commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses

Pour commander l'onduleur à trois niveaux par la modulation de largeurs d'impulsions (M.L.I), nous avons étudié une stratégie de commande qui permet de générer une source de tension se rapprochant d'une sinusoïde, et qui est la commande triangulo-sinusoïdale. Le principe de cette stratégie consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie que l'on veut obtenir), avec deux porteuses. Deux paramètres caractérisent cette stratégie [34].

➤ **L'indice de modulation m**

C'est le rapport entre la fréquence de la porteuse f_p et la fréquence f de la référence.

$$m = \frac{f_p}{f}$$

➤ **Le taux de modulation**

Ou coefficient de réglage de tension r : égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence sur la valeur crête de la porteuse: $r = \frac{V_m}{U_{pm}}$, avec $U_{pm} = 2U_c$

Pour améliorer le taux d'harmoniques de la tension de sortie, on choisit deux porteuses identiques diphasées d'une demi-période de hachage $\frac{1}{2f_p}$ l'une de l'autre [18], [32].

Les porteuses en dents de scie bipolaires permettent un taux d'harmonique le plus faible, mais avec des harmoniques paire et impaire [32].

II.4.2 Algorithme de commande

L'algorithme de génération des ordres de commande des interrupteurs avec cette stratégie peut être résumé en deux étapes :

➤ Etape 1 : La détermination des tensions intermédiaires V_{K1} et V_{K0} :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{refk} \geq U_{p1} \Rightarrow V_{k1} = U_{c1} \\ V_{refk} < U_{p1} \Rightarrow V_{k1} = 0 \end{array} \right. \quad \text{Et} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{refk} \geq U_{p2} \Rightarrow V_{k0} = 0 \\ V_{refk} < U_{p2} \Rightarrow V_{k0} = -U_{c2} \end{array} \right. \quad (\text{II.25})$$

➤ Etape 2 : Détermination des tensions V_{K2} et des ordres de commande B_{Ks} des interrupteurs :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{k2} = U_{c1} \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 1 \\ V_{k2} = -U_{c2} \Rightarrow B_{k1} = 0, B_{k2} = 0 \\ V_{k2} = 0 \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{k2} = V_{k1} + V_{k0} \\ B_{k3} = \overline{B_{k2}} \\ B_{K4} = \overline{B_{k1}} \end{array} \right. \quad (\text{II.27})$$

II.4.2.1 Caractéristiques des tensions de référence

Pour que l'onduleur génère un système triphasé équilibré, il faut utiliser des signaux de référence de forme sinusoïdale.

$$\begin{cases} V_{ref1}(t) = V_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ V_{ref2}(t) = V_m \cdot \sin(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref3}(t) = V_m \cdot \sin(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.28)$$

La figure II.4.2.1 représente les deux porteuses et les trois tensions de référence pour $m=15, r=0.9$ et pour $m=27, r=0.9$.

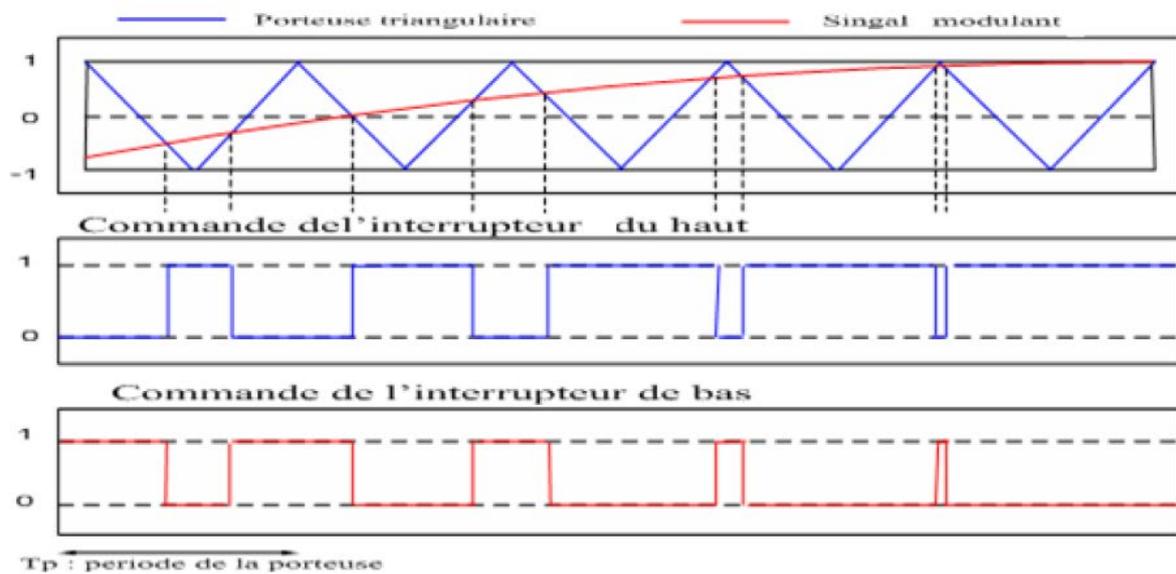
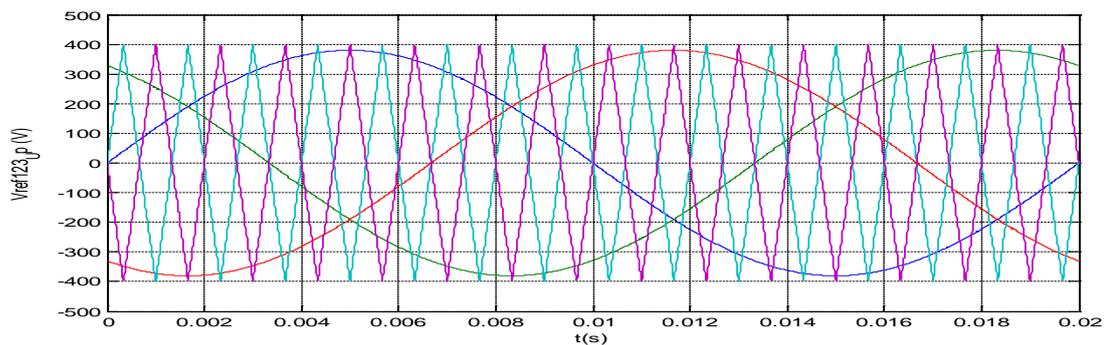
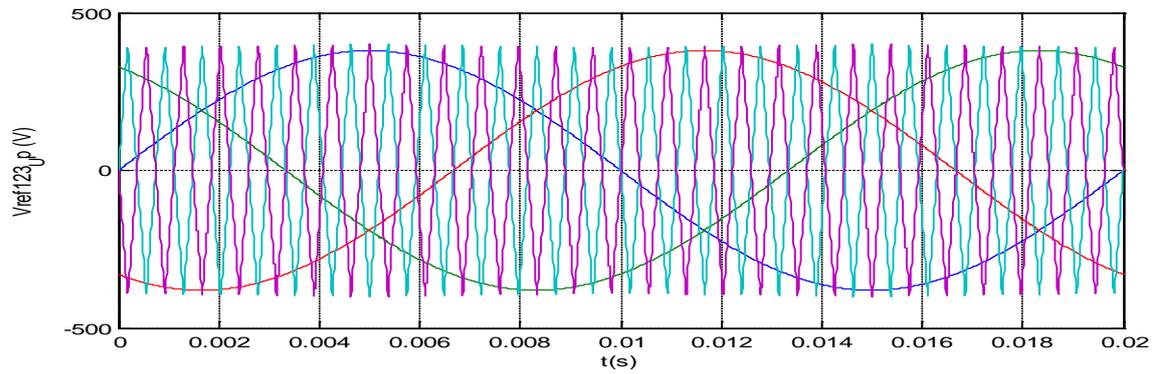


Figure II.11 : principe de la commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses.



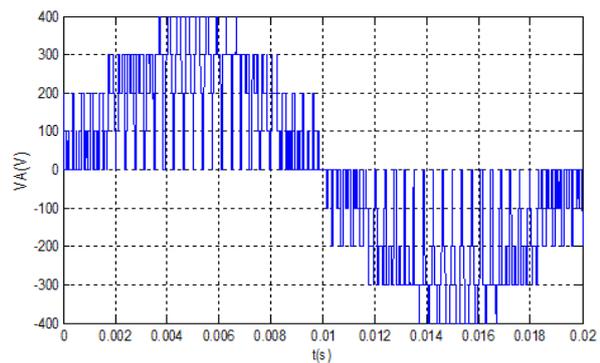
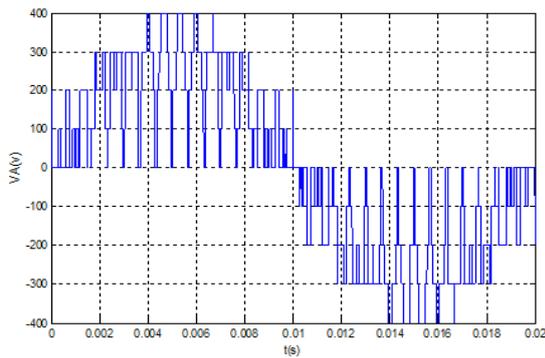
$$m=15, r=0.9$$



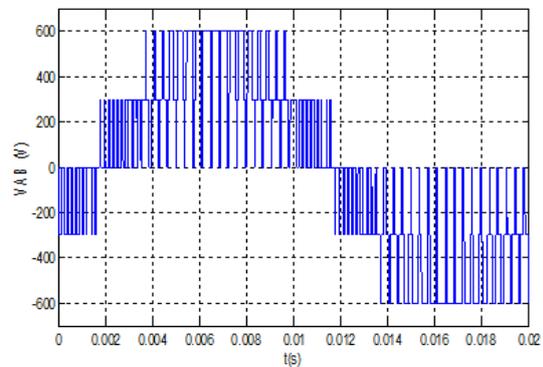
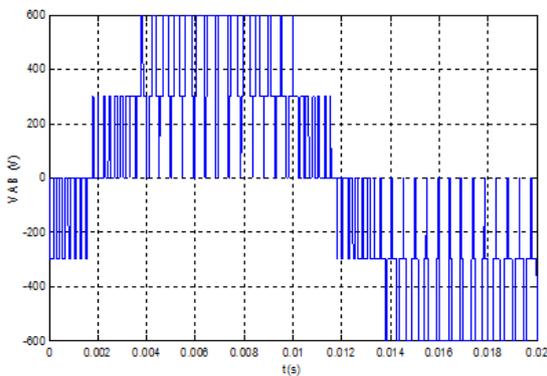
$$m=27, r=0.9$$

Figure II.12 : Les deux porteuses et les trois signaux de référence de l'onduleur triphasé à trois niveaux.

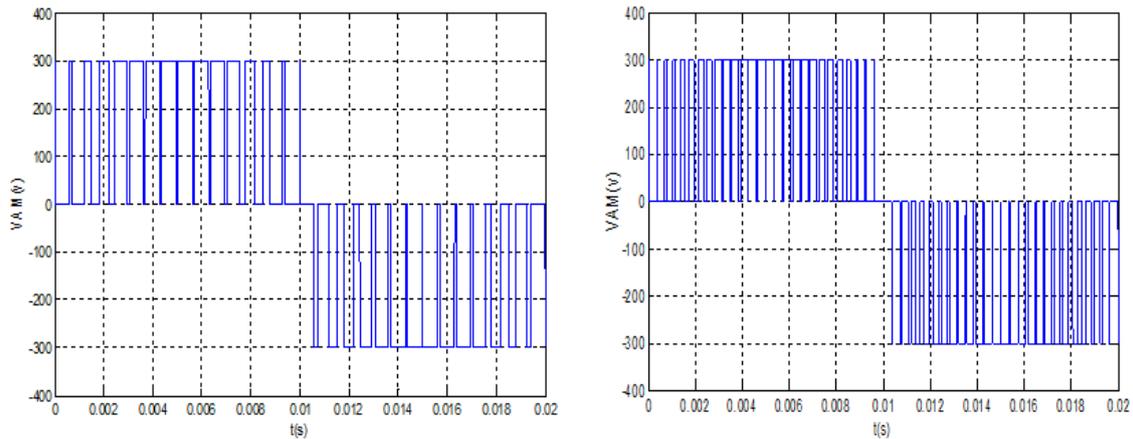
II.5 Simulation et interpretation



a) La tension simple



b) La tension composée



c) La tension V_{AM}

Figures II.13 : Tensions de sortie de l'onduleur N.P.C triphasé à trois niveaux pour $m=15$ à gauche et pour $m=27$ à droite

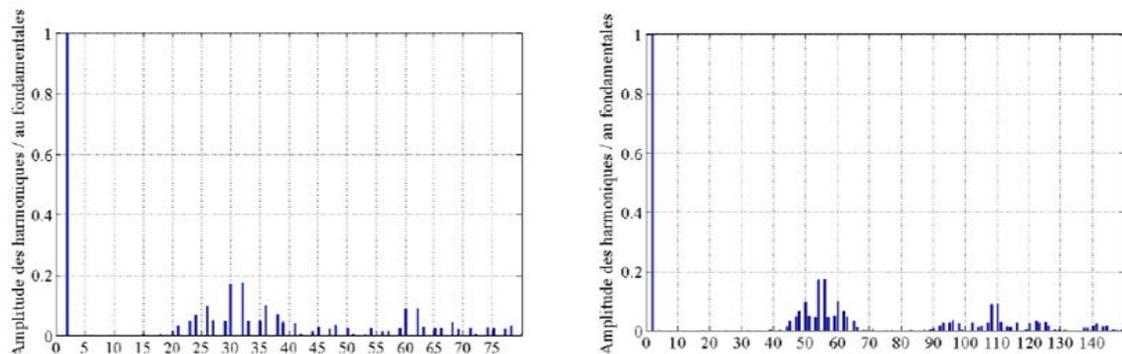


Figure II.14 : Rang d'harmonique pour $m=15$ à gauche et pour $m=27$ à droite

D'après les résultats obtenus par la simulation, on constate que :

- ✓ La tension V_{AM} représente les trois niveaux de tension ($0, U_{c1}$ et $-U_{c2}$).
- ✓ La tension composée représente cinq niveaux de tension ($2U_{c1}, U_{c1}, 0, -2U_{c2}, -U_{c2}$).
- ✓ Les harmoniques se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de la fréquence de commutation $2mf$. La première famille centrée autour des fréquences multiples de $2mf$ est la plus importante du point de vue amplitude.
- ✓ La tension V_A se décompose seulement en harmonique impaires.
- ✓ Le positionnement des harmoniques dépend de la valeur de l'indice de modulation ' m '. Si m augmente, les harmoniques sont poussés vers des fréquences élevées, ce qui facilite leurs filtrage par l'inductance de la machine.

II.6 Les harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance (figure IV.1) [33]. Leur apparition dans un réseau électrique est due à :

- Une ondulation ondulée par équipement d'électronique de puissance (onduleur, redresseur,..).
- Un défaut au niveau de la charge.

On définit le THD (Distorsion Totale des Harmoniques) par :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{b_2^2 + b_3^2 + \dots}}{b_1} = \frac{\sqrt{\sum b_i^2}}{b_1}$$

Avec: b_1 : Amplitude de fondamental.

b_i : Amplitude de l'harmonique i ($i=2, n$).

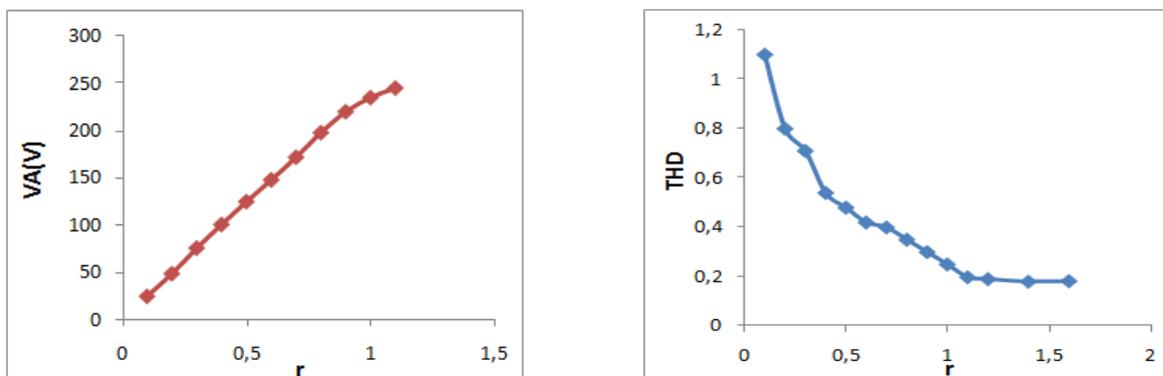


Figure II.16 : Variation de l'amplitude du fondamental et le taux d'harmonique pour $m=15$

La caractéristique qui donne la variation de l'amplitude de fondamental de la tension V_A en fonction de taux de régulation r montre que :

- On peut réguler l'amplitude de fondamental de la tension V_A uniquement pour r varie entre 0 et 0.94
- Le taux des harmoniques diminue quand r augmente.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons nous avons établi la modélisation de la machine asynchrone. On se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique à été établi, dont la complexité à été réduite, ce modèle à été simplifié à l'aide de la transformation de Park. Puis nous avons présenté le modèle de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure N.P.C. Après la présentation de ce modèle, on a constaté que l'onduleur triphasé à trois niveaux est la mise en série de deux onduleurs triphasés à deux niveaux.

L'onduleur est constitué de trois bras identiques, pour cela, nous avons fait l'analyse topologique d'un seul bras, puis nous avons déterminé les différentes configurations possibles. Nous avons remarqué que la tension aux bornes de chaque interrupteur diminue si le niveau de l'onduleur augmente, ce qui veut dire pour monter en tension et en puissance, on utilise des onduleurs qui ont un niveau élevé.

Et à la fin de ce chapitre, nous avons présenté la technique de modulation MLI pour déterminer les séquences de commutation des interrupteurs de l'onduleur à trois niveaux , et finalement la simulation de l'onduleur triphasé à trois niveaux à l'aide de logiciel SIMULINK/MATLAB.

Cette étude nous a montré que pour pousser les harmoniques vers des fréquences élevées, on augmente l'indice de modulation m .

Chapitre III:

Commande vectorielle en puissances active et réactive de la MADA

Introduction

Le positionnement des machines asynchrones est rendu aujourd'hui possible en lui appliquant des techniques d'orientation de champ. Ces techniques permettent d'obtenir un modèle dynamique découplé semblable au modèle de la machine à courant continu.

Des travaux récents sur l'électronique de puissance et la commande des machines ont apporté des améliorations importantes aux dispositifs d'entraînement à vitesse variable.

III.2 Stratégie de commande de la MADA

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que l'intérêt d'utilisation de la MADA, outre la taille des convertisseurs, était de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne. Cette caractéristique montre que pour chaque vitesse du vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance) [5], permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale, à vitesse du vent donnée, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est-à-dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissance que la machine peut alors être commandée.

III.2.1 Commande vectorielle en puissance active et réactive de la MADA

Le principe général de la commande vectorielle en puissances active et réactive est illustré sur la figure suivante :

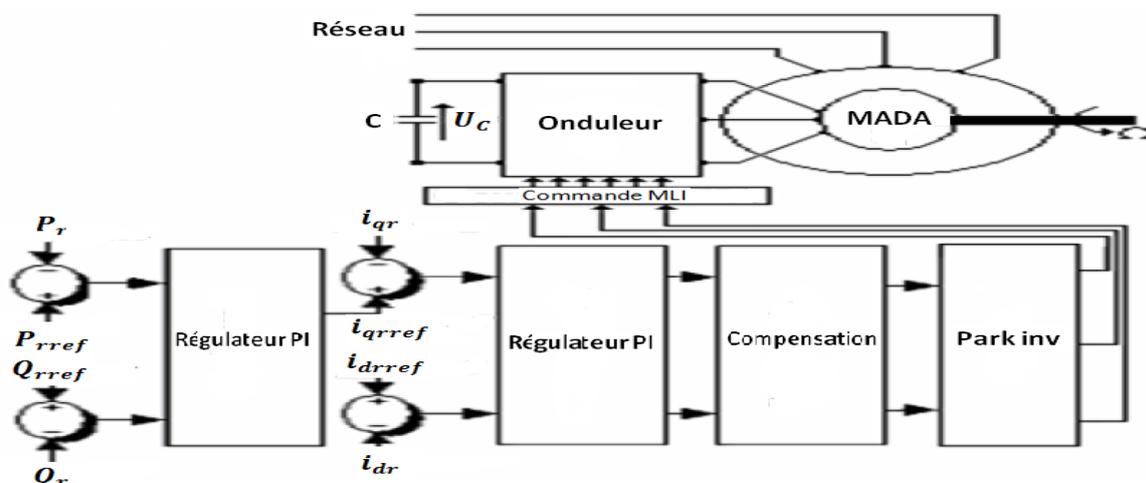


Figure III.1 Principe général de la commande vectorielle en puissances active et réactive rotorique de la MADA

Chapitre III : Commande vectorielle de la MADA en puissances active et réactive

Dans le cadre de ce mémoire, nous développons la commande vectorielle en puissances active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère d-q suivant le flux rotorique, donc on aligne le vecteur flux rotorique suivant l'axe direct. Ce choix d'orientation est caractérisé par le système suivant :

$$\begin{cases} \phi_{qr} = 0 \\ \phi_{dr} = \phi_r \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

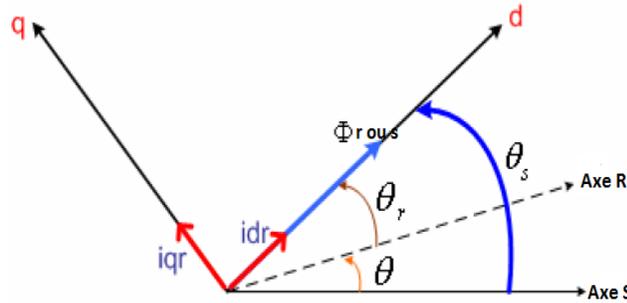


Figure III.2: Orientation de flux

L'expression du couple électromagnétique (II-9) devient alors comme suite :

$$C_{em} = P i_{qr} \phi_r \quad (\text{III.2})$$

Cette relation montre bien que le modèle de la MADA est similaire à celui de la machine à courant continu.

Le modèle diphasé de la MADA se réécrit alors comme suite :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} (\phi_r) \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega) \phi_r \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

$$\begin{cases} \phi_r = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ 0 = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{M} (\phi_r - L_r i_{dr}) \\ i_{qs} = -\frac{L_r}{M} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

On remplace i_{ds} et i_{qs} dans les équations électriques, et après les calculs on obtient le système final suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = -\alpha \cdot i_{dr} - \frac{L_s L_r}{M} \cdot \sigma \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_s \cdot \frac{L_s L_r}{M} \cdot \sigma \cdot i_{qr} + \beta \cdot \phi_r + \frac{L_s}{M} \cdot V_{dr} \\ V_{qs} = -\beta \cdot L_r \cdot i_{qr} - \frac{L_s L_r}{M} \cdot \sigma \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_s \cdot \frac{L_s L_r}{M} \cdot \sigma \cdot i_{dr} + \omega_s \cdot \frac{L_s}{M} \cdot \phi_r \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} (\phi_r) \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega) \phi_r \end{array} \right. \quad (III.6)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{R_s L_r + R_r L_s}{M} \\ \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \\ \beta = \frac{R_s}{M} \end{array} \right. \quad (III.7)$$

III.2.2 Structure d'alimentation en tension de la machine

Pour réaliser la commande en puissance de notre machine, afin de découpler les grandeurs réelles (couple, vitesse), on ressortie premièrement les variables de commande qui sont les deux tensions V_{dr} et V_{qr} qui sont générées par le bloc de découplage, qui a comme entrées les grandeurs de consignes P_{rref} et Q_{rref} [18], [5].

Cette commande en puissances active et réactive n'est valable qu'en régime permanent, car la mesure de la puissance au rotor sera erronée dès que le réseau subit à un défaut, pour cela il est recommandé de faire certaines hypothèses liées au mode de fonctionnement en ce régime à savoir la non dépendance des grandeurs électriques du temps.



Figure III.3: Les tensions de commande

Pendant le régime permanent, on peut considérer (ϕ_r) est constant, et par suite $\frac{d}{dt} (\phi_r) = 0$. [4], [5], [18].

Le glissement : $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$

Les équations rotoriques deviennent :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + g \omega_s \phi_r \end{cases} \quad (III.8)$$

D'où

$$\phi_r = \frac{1}{g\omega_s}(V_{qr} - R_r i_{qr}) \quad (\text{III.9})$$

En remplaçant l'équation (III.9) dans le système (III.6), on obtient les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_{ds} = -\alpha_{r1} i_{dr} - \tau \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_s \tau i_{qr} + \frac{\beta}{g} V_{qr} + \frac{L_s}{M} V_{dr} \\ V_{qs} = -\alpha_{r2} i_{dr} - \tau \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_s \tau i_{qr} + \frac{L_s}{M} \cdot \frac{V_{dr}}{g} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$$\begin{cases} \alpha_{r1} = \frac{R_s L_r + R_r L_s}{M} \\ \alpha_{r2} = \frac{R_s L_r + \frac{R_r L_s}{g}}{M} \\ \tau = \frac{L_s L_r}{M} \sigma \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Les puissances rotoriques :

$$\begin{cases} P_r = R_r \cdot i_{dr}^2 + R_r \cdot i_{qr}^2 + g \cdot \omega_s \cdot \phi_r \cdot i_{qr} \\ Q_r = g \cdot \omega_s \cdot \phi_r \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Les pertes Joules rotoriques :

$$P_{jr} = R_r (i_{qr}^2 + i_{dr}^2) \quad (\text{III.13})$$

Le stator de la MADA est connecté à un réseau équilibré, ce qui nous a permet de mettre l'hypothèse que le flux est maintenu constant, et égal à sa valeur nominale [4].

Sous cette hypothèse, le couple électromagnétique produit par la machine et la puissance active dépendant uniquement du courant rotorique d'axe quadrature. Ce qui veut dire que la puissance active est proportionnelle à i_{qr} [18].

Pour un point de fonctionnement donné caractérisé par la vitesse électrique ω , les puissances active et réactive rotoriques s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} P_r - P_{jr} = k \cdot i_{qr} \\ Q_r = k \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Avec : $k = g \cdot \omega_s \cdot \phi_r$

III.2.3 Structure du bloc de découplage

A partir de système (III.14), le bloc de découplage est donné par les équations suivantes avec sa structure illustrée par la Figure(III.3) :

$$\begin{cases} i_{drref} = \frac{P_{rref}}{K} \\ i_{qrref} = \frac{Q_{rref}}{K} \end{cases} \quad (III.15)$$

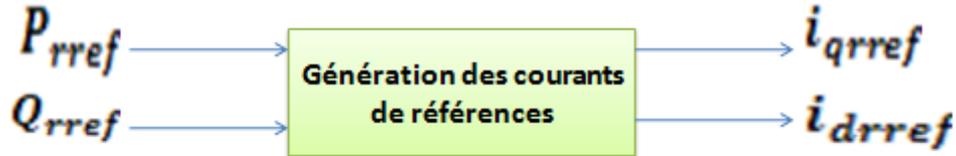


Figure III.4: Bloc de génération des courants de références

On pose V_{d1} et V_{d2} deux nouvelles grandeurs indépendantes, telles que :

$$\begin{cases} V_{d1} = \alpha_{r1} i_{dr} + \tau \frac{di_{dr}}{dt} \\ V_{q1} = \alpha_{r2} i_{dr} + \tau \frac{di_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (III.16)$$

Le système (III.10) devient :

$$\begin{cases} V_{ds} + V_{d1} = -\omega_s \tau i_{qr} + \frac{\beta}{g} V_{qr} + \frac{L_s}{M} V_{dr} \\ V_{qs} + V_{d2} = \omega_s \tau i_{dr} + \frac{L_s}{Mg} V_{qr} \end{cases} \quad (III.17)$$

III.2.4 Le schéma bloc de la structure de commande de la MADA alimentée en tension

Les équations (III.16) et (III.17) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler (Figure III.4).

Ce schéma fait apparaître deux régulateurs pour chaque axe, le premier pour réguler le courant et l'autre pour réguler la tension. Mais dans notre cas, on a considéré que la MADA est connecté à un réseau stable ce qui veut dire que la tension statorique est maintenue constante, et par suite les régulateurs de tension sont inutiles [5].

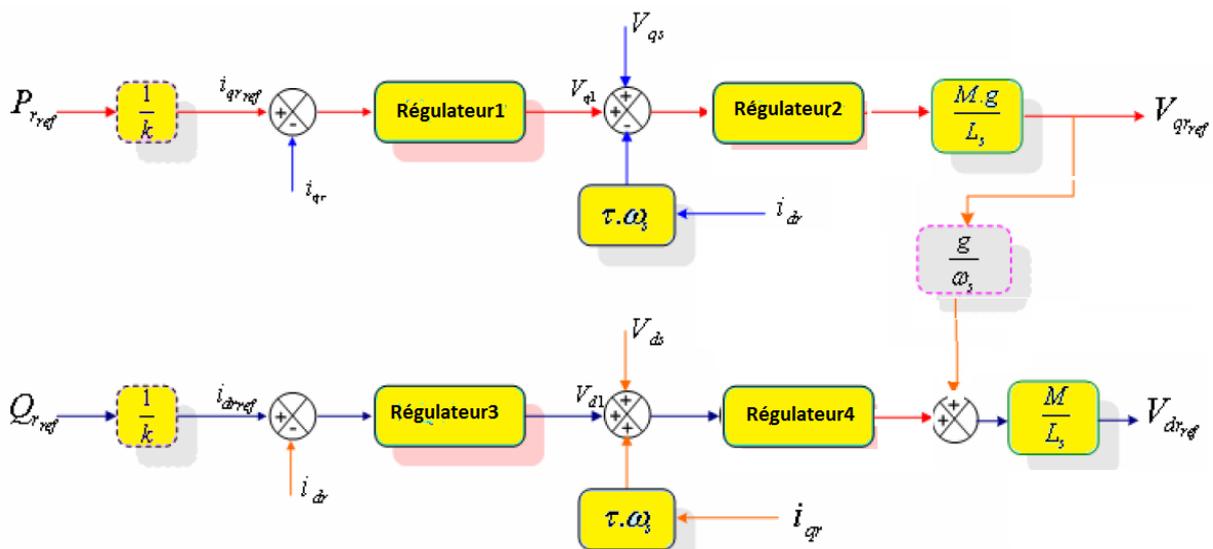


Figure III.5: schéma bloc de la structure de commande de la MADA alimentée en tension

La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire coté stator. La consigne de puissance active permettra à la machine de fonctionner à la puissance maximale confèrent le meilleur rendement possible au système éolien. Les deux courants de référence sont obtenus à partir du contrôle des puissances active et réactive.

III.2.5 Calcul des paramètres des régulateurs de courant

Pour les réglages industriels, quelques structures de base sont introduites, comme le réglage classique ; le réglage d'état, le réglage par le mode de glissement et le réglage en cascade.

Dans le cas de notre étude, nous présentons le réglage classique avec le régulateur PI utilisé pour commander la MADA en générateur, ce régulateur satisfait avec succès la régulation en commande vectorielle du point de vue (stabilité, précision et la rapidité).

La fonction de transfert du régulateur de courant est donnée par :

$$R(S) = \frac{1+T_1S}{T_2S} = K_p + \frac{K_i}{S} ; \text{ avec : } \begin{cases} K_p = \frac{T_1}{T_2} ; \text{ gain proportionnel du reguleur} \\ K_i = \frac{1}{T_2} ; \text{ gain integral du reguleur} \end{cases}$$

Les fonctions de transfert des courants rotoriques i_{qr} et i_{dr} :

$$R_1(S) = \frac{i_{dr}(S)}{V_{d1}(S)} = \frac{1}{\alpha_{r1} + \tau.S}$$

$$R_2(S) = \frac{i_{qr}(S)}{V_{q1}(S)} = \frac{1}{\alpha_{r2} + \tau.S}$$

Chapitre III : Commande vectorielle de la MADA en puissances active et réactive

Les fonctions de transfert des courants en boucle ouverte FTBO :

$$FTBO_{i_{dr}} = \frac{1/\alpha_{r1}}{1 + \frac{\tau}{\alpha_{r1}}s} (K_p + \frac{K_i}{s})$$

$$FTBO_{i_{qr}} = \frac{1/\alpha_{r2}}{1 + \frac{\tau}{\alpha_{r2}}s} (K_p' + \frac{K_i'}{s})$$

Les fonctions de transfert des courants en boucle fermée FTBF :

$$FTBF_{i_{dr}} = \frac{FTBO_{i_{dr}}}{1 + FTBO_{i_{dr}}}$$

$$FTBF_{i_{qr}} = \frac{FTBO_{i_{qr}}}{1 + FTBO_{i_{qr}}}$$

La figure suivante montre le schéma bloc de la régulation de courant rotorique.

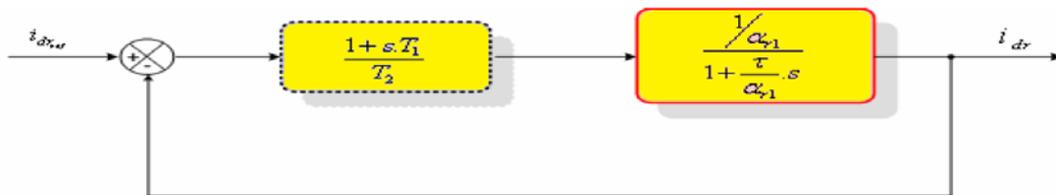


Figure III.6: schéma bloc de la régulation de courant rotorique(i_{dr}) .

Pour ramener le système en boucle fermée à un système de premier ordre, nous choisissons la méthode de compensation de pôles la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\tau}{\alpha_{r1}} \\ T_1' = \frac{\tau}{\alpha_{r2}} \end{cases}$$

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 le gain des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation moins performante [6].

Si l'on effectue la compensation, on obtient les FTBFs suivantes :

$$FTBF_{i_{dr}} = \frac{1}{1 + \tau_d s}$$

$$FTBF_{i_{qr}} = \frac{1}{1 + \tau_d' s}$$

Avec τ_d et τ_d' les temps de réponse.

Le schéma bloc global est représenté par la figure suivante :

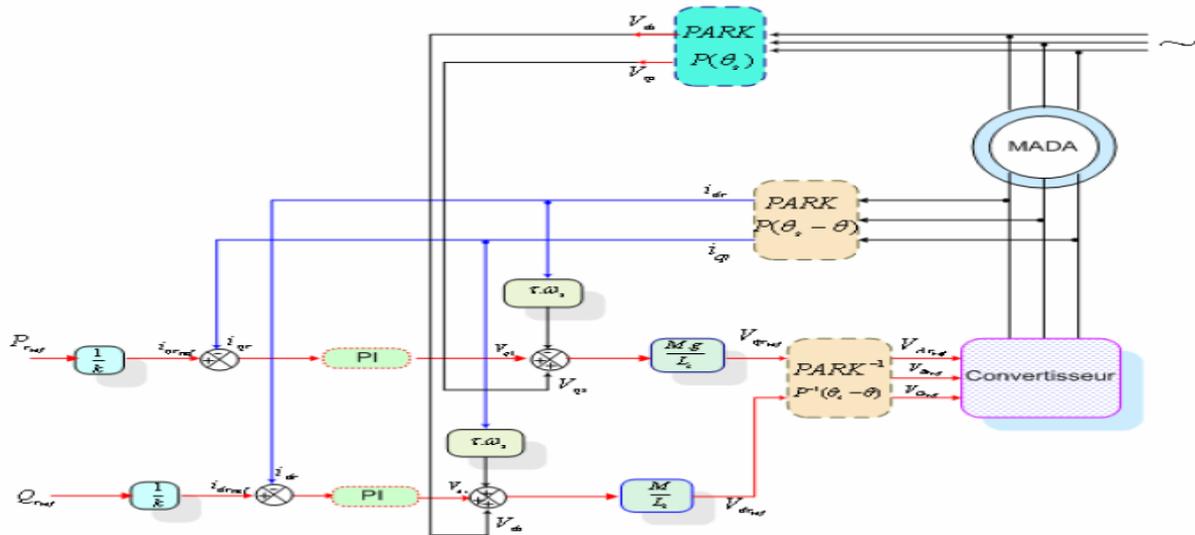
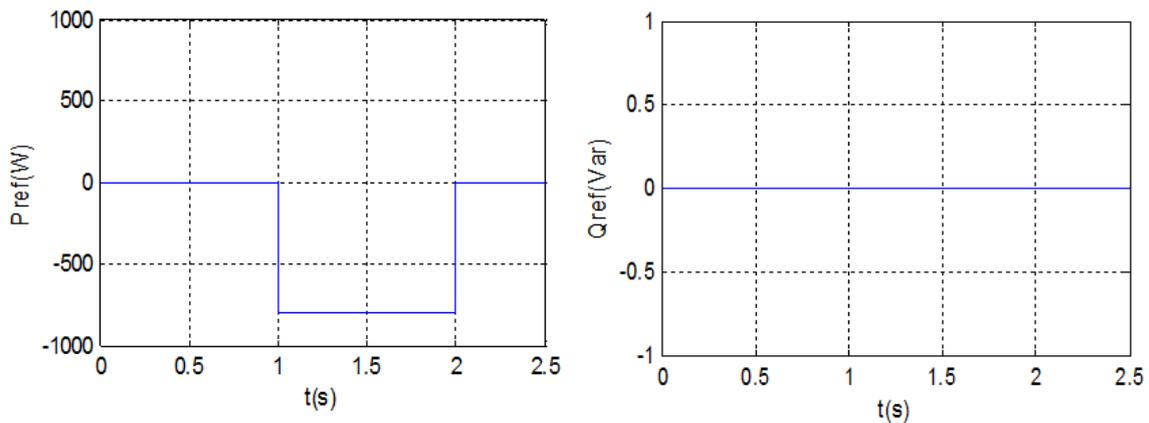


Figure III.7: Le schéma bloc global de la structure de commande de la MADA alimentée en tension.

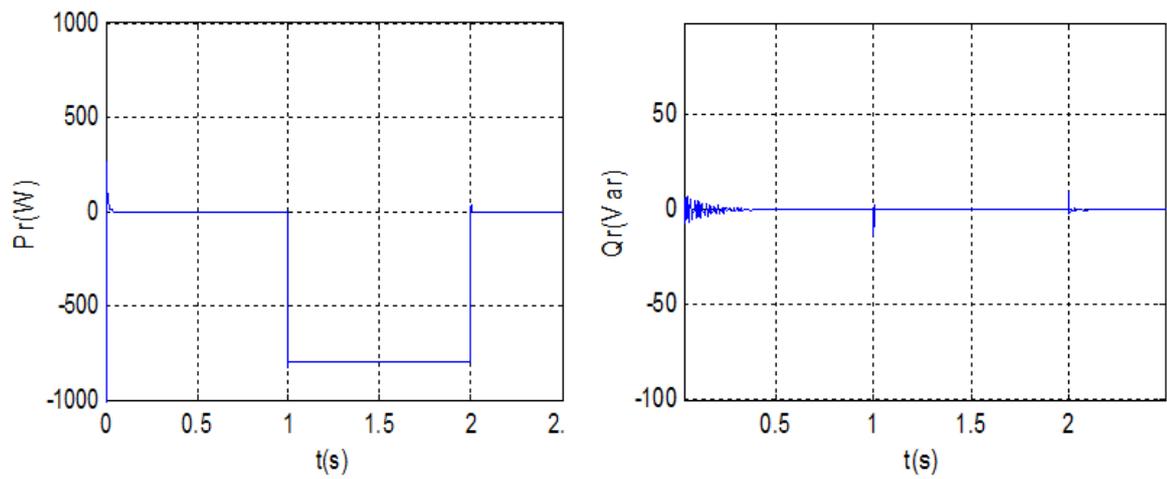
III.3 Simulation et interprétation

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance active et réactive rotorique appliquée à la MADA, entraînée à une vitesse fixe et pilotée par un onduleur à trois niveaux inséré au rotor de la machine.

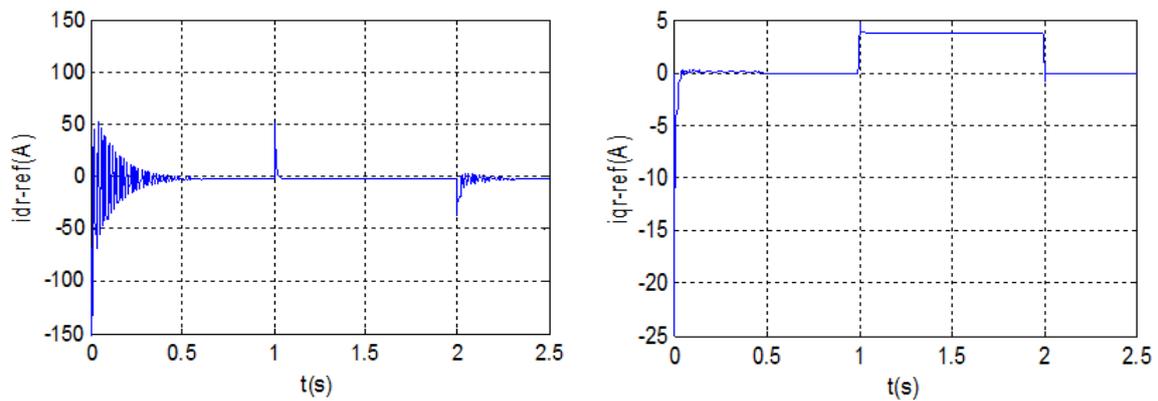
- Le générateur est entraîné à une vitesse constante.
- $Q_{ref} = 0$ Pendant tout l'essai.
- On applique un échelon négatif : $P_{rref} = -800W$ dans l'intervalle [1,2] s.



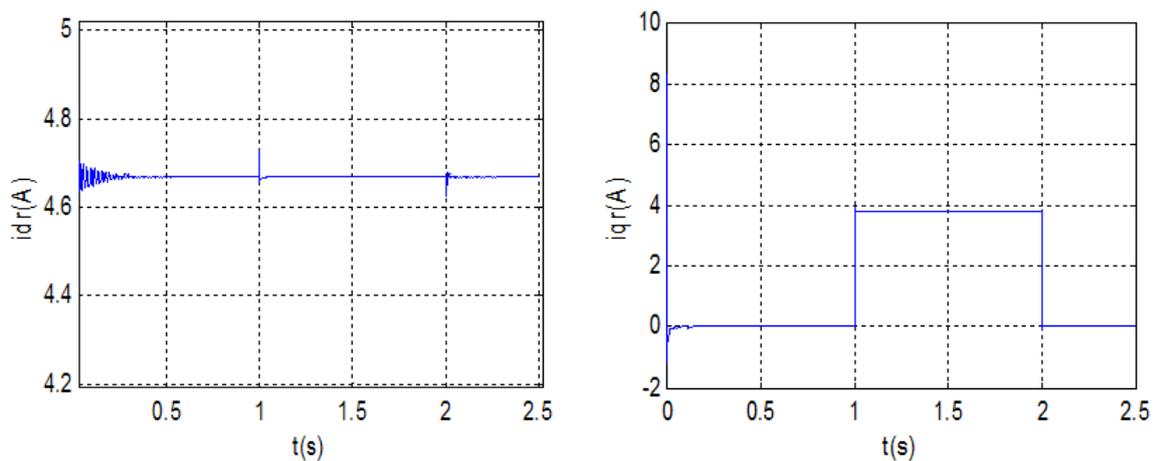
a) Les puissances rotorique de référence



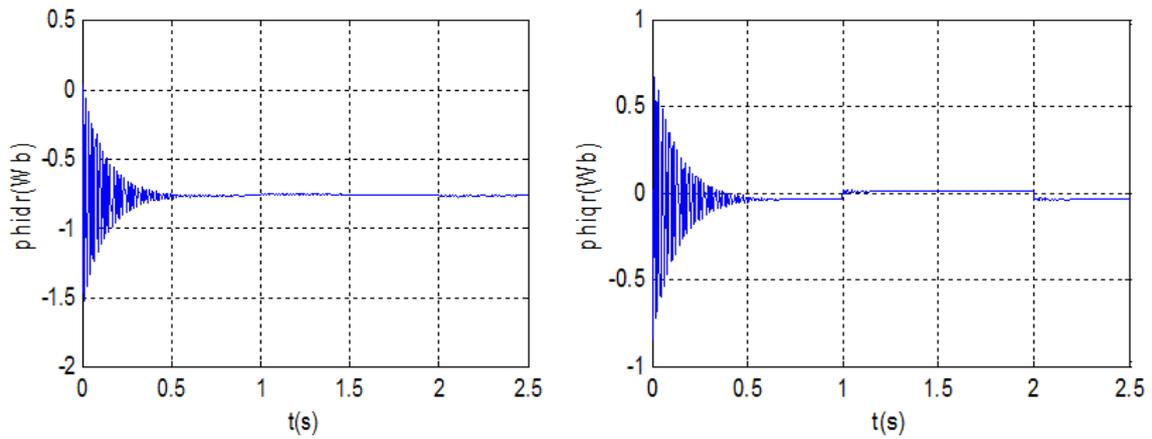
b) Les puissances rotorique



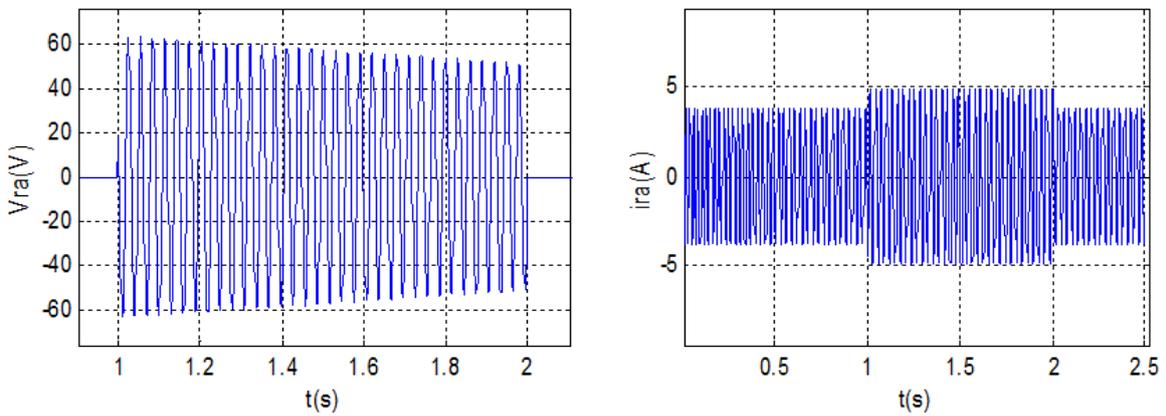
c) Les courants de référence



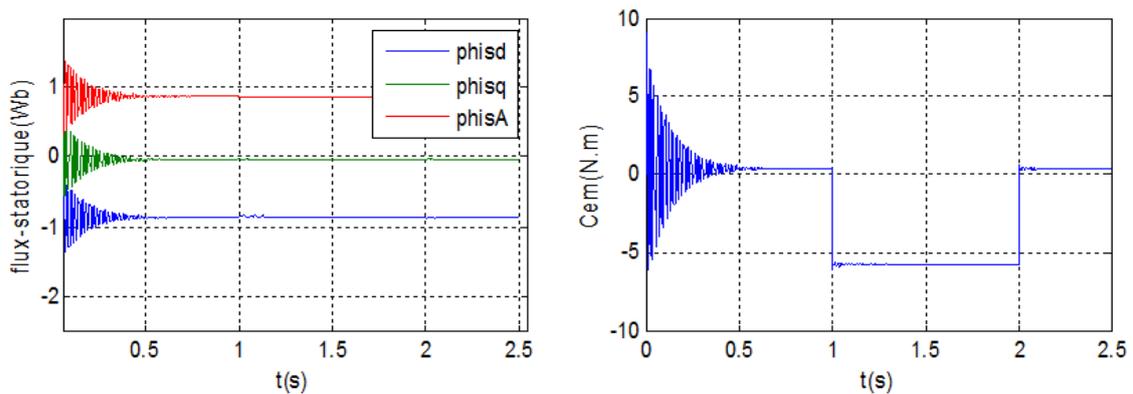
d) Les courants rotoriques



e) Les flux rotoriques



f) Tension et courant d'une phase rotorique



g) Flux statorique et couple électromagnétique

Figure III.7 : Résultats de simulation de la commande vectorielle en P et Q (a,b,c,d,e,f,g) de la MADA

Chapitre III : Commande vectorielle de la MADA en puissances active et réactive

D'après les résultats obtenues pour la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), en puissances active et réactive rotoriques, on constate que :

- Les courants de références i_{dref} et i_{qref} représentent respectivement les images des puissances réactive et active.
- La tension V_{ra} présente une allure sinusoïdale.
- On remarque que le couple électromagnétique réagit spontanément quand il ya une demande en puissance active, indépendant de la puissance réactive.
- La composante en quadrature du flux Φ_{qr} est presque nulle en régime permanent ce qui confirme les hypothèses de la commande vectorielle.
- On remarque l'effet du couplage entre les deux puissances P et Q , car dès que P_{ref} passe de (0 à -800) à $t=1s$, on observe une faible oscillation dans le graphe de la puissance réactive Q.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et appliqué la commande vectorielle en puissances active et réactive rotoriques de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en mode génératrice. Pour réaliser cette commande, deux boucles de régulation ont été présentées (une boucle régule les puissances active et réactive et une autre boucle pour la régulation des courants par des régulateurs de type PI). Un choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux rotorique selon l'axe d, par conséquent, la puissance active sera dépendante uniquement du courant i_{qr} (relation III.12). Les résultats obtenus par la simulation s'avèrent satisfaisants, vu la stabilité des différentes grandeurs qui constituent la machine asynchrone à double alimentation.

Chapitre IV :

Cascade Redresseur trois niveaux-Onduleur trois niveaux-MADA

Introduction

L'onduleur triphasé à trois niveaux que nous avons utilisé, possédait comme entrées les deux tensions constantes U_{c1} et U_{c2} , mais en réalité ces tensions sont délivrées par un redresseur.

Une grande variété de redresseurs a été proposée par différents auteurs [20], pour assurer l'alimentation réelle de l'onduleur à trois niveaux, ces redresseurs peuvent être à MLI ou non, on peut distinguer :

-Les redresseurs de tension monophasés ou triphasés.

-Les redresseurs de courant à M.L.I monophasés ou triphasés, à deux ou trois niveaux.

Dans notre mémoire, nous utiliserons un redresseur de courant triphasé à trois niveaux à M.L.I.

IV.1 Redresseur triphasé à trois niveaux

IV.1.1 Modélisation du redresseur

Par la conception, la structure de l'onduleur à trois niveaux est réversible, donc c'est ce qui explique la possibilité du fonctionnement en redresseur. Il suffit juste d'adopter les conventions suivantes :

- Génératrice pour la source de courant.
- Récepteur pour la source de tension.

La figure (IV.1) représente la structure générale du redresseur du courant triphasé à MLI à trois niveaux à structure N.P.C. Son rôle est de générer la tension de sortie continue aux bornes des capacités à partir d'une source triphasée alternative.

Le modèle de connaissance de ce redresseur est le même que celui élaboré pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, en tenant compte des nouvelles conventions des deux sources du redresseur.

Ce redresseur va être commandé par la M.L.I c'est-à dire que les grandeurs de sorties U_{c1} et U_{c2} seront modulées pour générer les grandeurs d'entrées V_A , V_B et V_C .

Le redresseur de courant triphasé à trois niveaux est constitué de douze interrupteurs bidirectionnels et six diodes médianes entre chaque bras et le point milieu M.

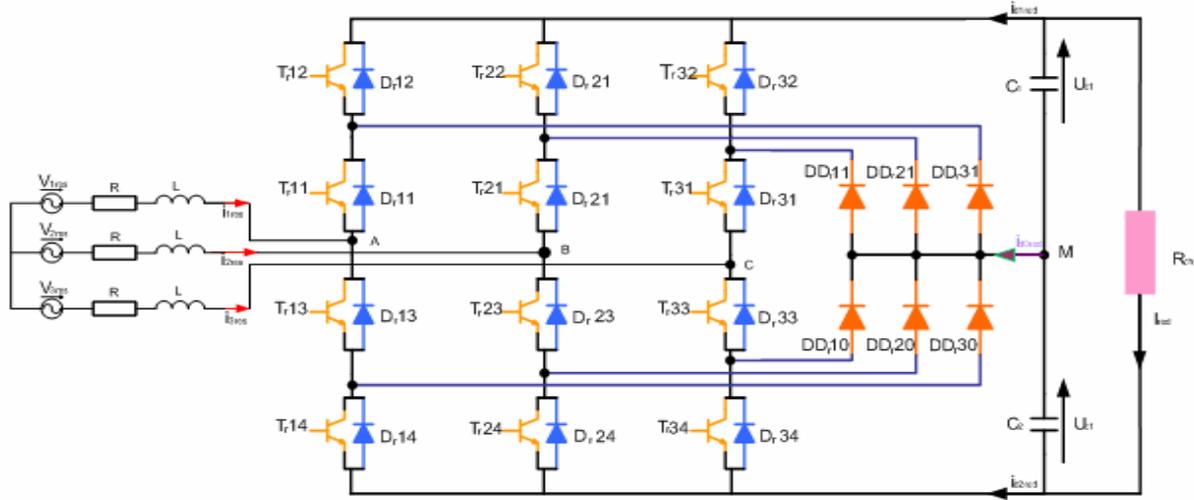


Figure IV.1 Redresseur de courant triphasé à M.L.I à trois niveaux à structure N.P.C

IV.1.2 Commande par hystérésis en courant appliquée au redresseur

Toutes les stratégies de commande possibles utilisées pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, sont aussi utilisables pour la commande de notre redresseur triphasé à trois niveaux [20].

Dans le cas 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 du réseau.

Les courants de référence qui alimentent notre redresseur à trois niveaux sont définis par le système ci-dessous.

$$\begin{cases} i_{1ref} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ i_{2ref} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \\ i_{3ref} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi) \end{cases} \quad (IV.1)$$

La valeur efficace I_{eff} des courants de référence est calculée afin de vérifier la conservation de la puissance à l'entrée et à la sortie du redresseur.

On applique le principe de la conservation de la puissance [46], on aura pour une charge résistive (Figure IV.2) :

$$V_{1res} \cdot i_{1res} + V_{2res} \cdot i_{2res} + V_{3res} \cdot i_{3res} = \frac{(U_{c1} + U_{c2})^2}{R_{ch}} \quad (IV.2)$$

$$3V_e \cdot I_e \cdot \cos \varphi + 3 \cdot R \cdot I_e^2 = \frac{(U_{c1} + U_{c2})^2}{R_{ch}} \quad (IV.3)$$

V_e : Valeur efficace des tensions du réseau.

I_e : Valeur efficace des courants du réseau.

En supposant un facteur de puissance de réseau unitaire ($\cos \varphi = 1$) et en négligeant les pertes Joule dans le réseau, on aura :

$$I_e = \frac{(U_{c1}+U_{c2})^2}{3.V_e.R_{ch}} \quad (IV.4)$$

IV.1.3 Commandabilité du redresseur

Pour assurer la commandabilité du redresseur, on doit s'assurer d'abord que la valeur initiale que prendra chacune des deux tensions U_{c1} et U_{c2} , soit supérieure à la valeur maximale V_{max} de la tension du réseau [46]. Cette condition doit être vérifiée à chaque instant. Ce type de condition est nécessaire également pour assurer un facteur de puissance unitaire. On peut voir ça clairement en faisant la représentation de Fresnel pour le circuit du réseau (figure IV.3).

D'après la figure (IV.1.1), on peut écrire les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{1res} = V_A + R \cdot i_{1res} + L \cdot \frac{di_{1res}}{dt} \\ v_{2res} = V_B + R \cdot i_{2res} + L \cdot \frac{di_{2res}}{dt} \\ v_{3res} = V_C + R \cdot i_{3res} + L \cdot \frac{di_{3res}}{dt} \end{array} \right. \quad (IV.5)$$

En négligeant la résistance R, on obtient les relations entre les grandeurs complexes :

$$\bar{V}_A = \bar{V}_{1res} - j \cdot L \cdot \omega \cdot \bar{I}_{ref} \quad \Rightarrow \quad |\bar{V}_A|^2 = V_{max}^2 + (L \cdot \omega \cdot I_{max})^2 \quad (IV.6)$$

Cela peut se traduire par le diagramme de Fresnel suivant :

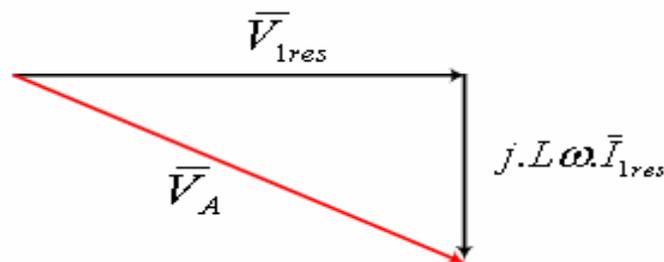


Figure (IV.2) : Représentation de Fresnel du circuit du réseau.

IV.1.4 Commande en courant par hystérésis

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté (l'amplitude et la fréquence). Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des

courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les références [46].

IV.1.5 Algorithme de la commande en courant par hystérésis

$$\left\{ \begin{array}{l} [(\varepsilon_k \geq \Delta i) \text{ et } (\varepsilon_k \leq 2. \Delta i)] \text{ or } [(\varepsilon_k \leq -\Delta i) \text{ et } (\varepsilon_k \geq -2. \Delta i)] \\ \varepsilon_k > 2. \Delta i \\ \varepsilon_k < -2. \Delta i \end{array} \right.$$

D'où :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = 1 \text{ et } B_{k2} = 0 \\ B_{k1} = 0 \text{ et } B_{k2} = 0 \\ B_{k1} = 1 \text{ et } B_{k2} = 1 \end{array} \right. \quad (IV.7)$$

Avec :

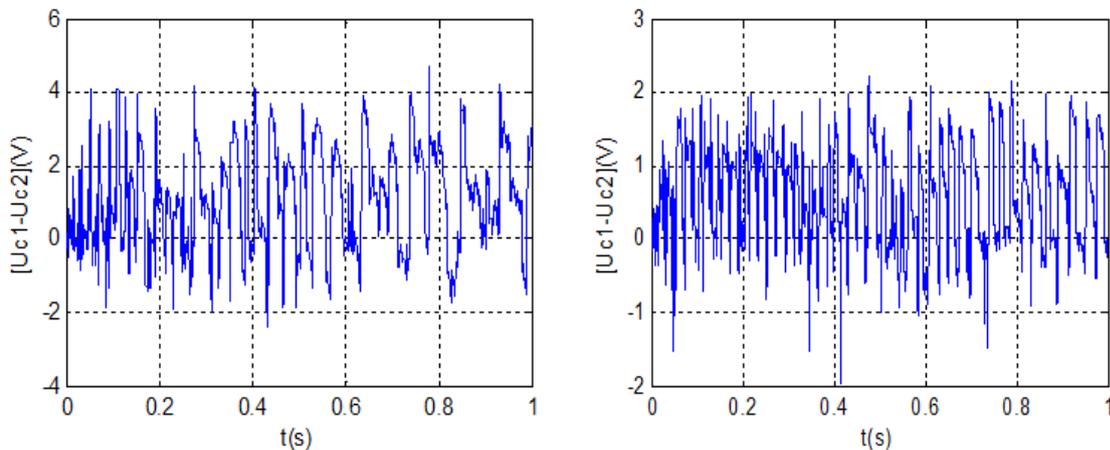
ε_k : L'écart entre le courant de référence i_{refk} et le courant réel i_{resk} tel que :

$$\varepsilon_k = i_{refk} - i_{resk} ; \quad k = (1, 2, 3)$$

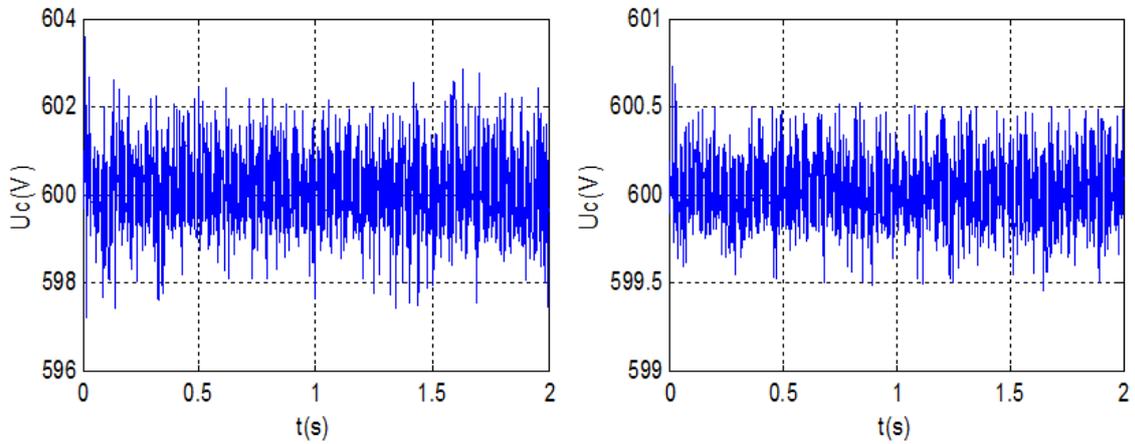
Δi : La largeur de la bande d'hystérésis.

IV.1.6 Simulation et interprétation

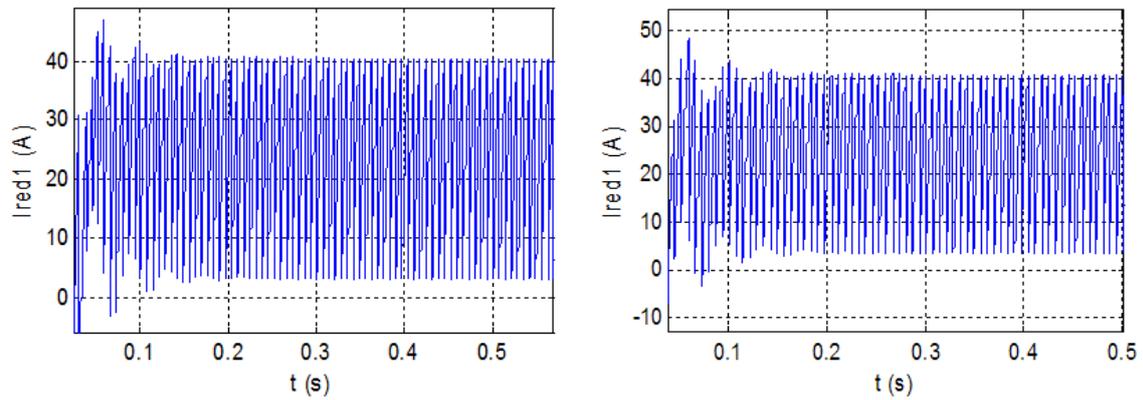
Les Figures (IV.1.6) représentent les résultats de simulation d'un redresseur triphasé à trois niveaux commandé par la stratégie d'hystérésis en courant ($\Delta i = 0.001$) lorsqu'il alimente une charge résistive .Ces simulations sont faites pour deux valeurs de capacité ($C_1 = C_2 = 10mF$) et ($C_1 = C_2 = 20mF$) avec $R_{ch} = 25\Omega$.



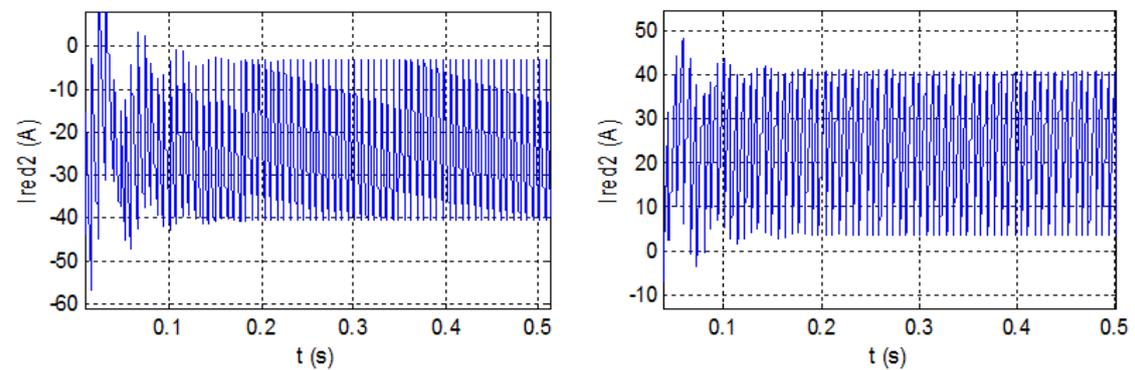
a) La différence des tensions U_{C1} et U_{C2}



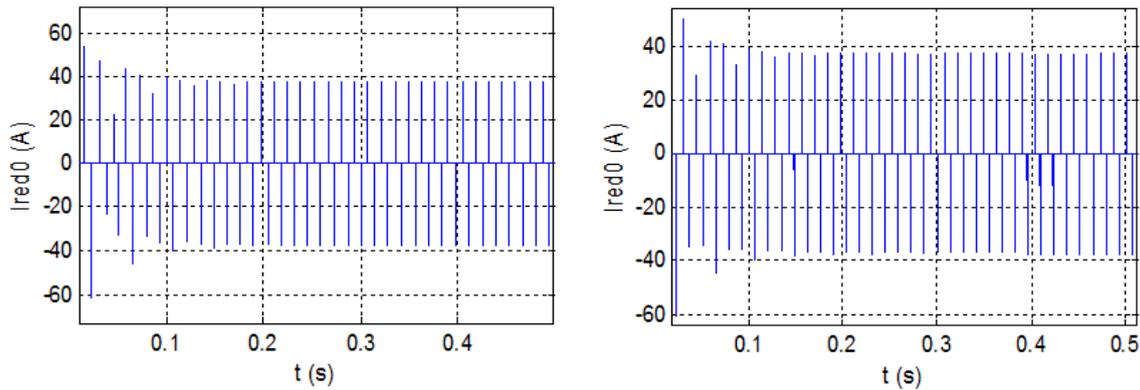
b) La tension du bus continu



c) Le courant redressé i_{red1}



d) Le courant redressé i_{red2}



e) Le courant redressé i_{red0}

Figures (IV.3) : Tensions et courants de sortie du redresseur triphasé à trois niveaux (a,b,c,d,e,f,g) avec ($C_1 = C_2 = 10\text{mF}$ et $R_{ch} = 25\Omega$) à gauche et ($C_1 = C_2 = 20\text{mF}$ et $R_{ch} = 25\Omega$) à droite.

Interprétation des résultats

- La différence des tensions ($U_{c1} - U_{c2}$) est plus importante dans le cas d'une capacité de faible valeur.
- Le courant i_{red1} à une valeur moyenne positive, le courant i_{red2} présente une allure opposée à celle de i_{red1} . Ceci est nécessaire pour que le courant i_{red0} ait une valeur moyenne nulle. Comme on peut le constater, le courant i_{red0} à une valeur moyenne pratiquement nulle. Et c'est le but recherché de cette alimentation pour assurer l'équilibre du pont capacitif [46].

IV.2 Cascade redresseur N.P.C à trois niveaux- Onduleur N.P.C à trois niveaux-MADA-Turbine

Dans cette partie, on va étudier la cascade complète constituée :

- D'un redresseur de courant à structure N.P.C à trois niveaux, commandé par hystérésis.
- D'un onduleur de tension à structure N.P.C à trois niveaux, commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses.
- De la MAS à rotor bobiné commandée en puissance active et réactive (vectorielle).
- De la turbine éolienne commandée par la technique d'extraction de maximum de puissance du vent « commande MPPT ».

IV.2.1 Structure de la cascade

Cette cascade est constituée d'une Turbine-MADA connectée au réseau par son stator, le rotor de cette dernière est connecté à un redresseur à trois niveaux à structure N.P.C associé

à un onduleur aussi à trois niveaux et à structure N.P.C. Cette interface électronique jouera le rôle d'un changeur de fréquence indirect, car elle permet, à partir des tensions de sorties du rotor de la MADA à fréquence et amplitude variables, d'avoir un système à fréquence et amplitude fixes.

L'onduleur est commandé en tension par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses et le redresseur est commandé en courant par la stratégie en hystérésis.

Cette cascade est représentée dans la (figure V.2.1)

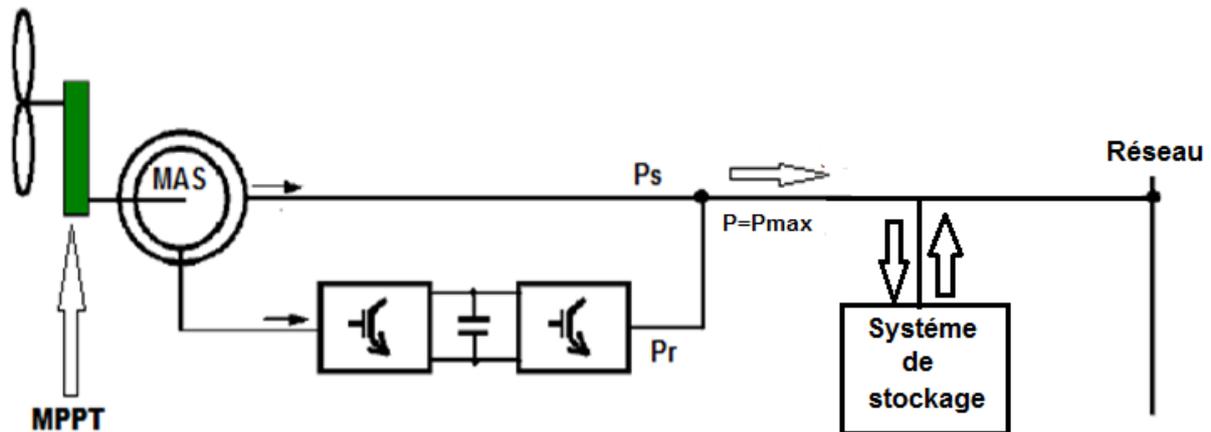


Figure IV.4 : Cascade d'un Redresseur de courant triphasé à trois niveaux-Onduleur de tension triphasé-MADA-Turbine.

Remarque

Etant donné que notre système est commandé toujours par la technique d'extraction de la puissance maximale MPPT (utilisation du même profil de la vitesse du vent représenté au chapitre I), il est à noter que la puissance fournie au réseau par notre système est toujours maximale. Ce qui nécessite un système de stockage.

La figure de la cascade complète représentée sur la (figure IV.4) montre l'écoulement des puissances statoriques et rotoriques produites par conséquence de la commande MPPT.

IV.2.2 Modélisation du filtre intermédiaire de la cascade

La (figure IV.5) représente la structure générale du filtre intermédiaire de la cascade. Son modèle est défini par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = i_{d1red} - i_{d1ond} \rightarrow R_1 \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = i_{d2red} - i_{d2ond} \rightarrow R_2 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} U_{c1} = \frac{1}{C_1} \int (i_{d1red} - i_{d1ond}) dt \\ U_{c2} = \frac{1}{C_2} \int (i_{d2red} - i_{d2ond}) dt \end{array} \right. \quad (IV.8)$$

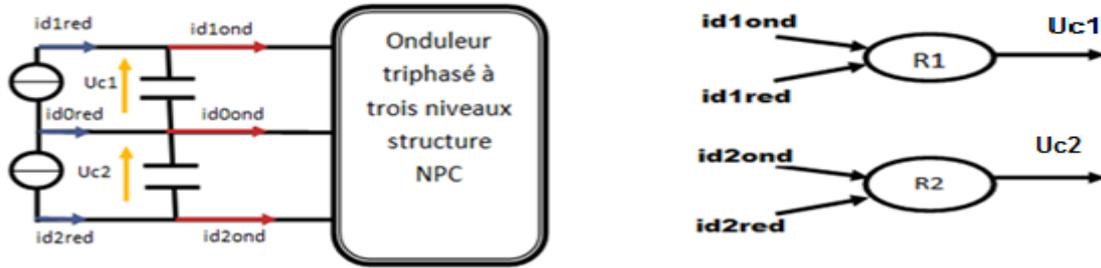


Figure IV.5 : Filtre intermédiaire de la cascade redresseur de courant triphasé à trois niveaux-onduleur triphasé à trois niveaux et son graphe informationnel.

D'après l'équation (IV.1), on constate que pour minimiser la différence entre les deux tensions U_{c1} et U_{c2} , en agissant sur les valeurs des capacités C_1 et C_2 .

On peut interpréter le système d'équation (IV.1) par le graphe informationnel de la figure (IV.5) en effet, les relations R_1 et R_2 de ce graphe représentent respectivement la première et la deuxième équation du système (IV.1). D'après la figure, on observe deux blocs indépendants, qui peuvent être commandés respectivement par i_{red1} et i_{red2} . Cependant, on doit noter que ces derniers sont par le même courant de réseau.

$$i_{d0} - i_{red0} = C \left(\frac{dU_{c1} - dU_{c2}}{dt} \right) \quad (IV.9)$$

Avec $C_1=C_2=C$

D'après cette dernière équation, on constate que pour avoir un potentiel du point milieu M plus stable, il faut avoir une valeur moyenne du courant i_{d0} nulle.

IV.II.3 Contrôle des courants côté réseau

Les puissances active et réactive transmises au réseau sont données dans le repère d, q comme suite [12] :

$$\begin{cases} P = V_{dr} \cdot i_{qr} + V_{qr} \cdot i_{dr} \\ Q = V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (IV.10)$$

A partir de ces équations, la régulation des courants côté réseau est envisagée en imposant des références pour les puissances active et réactive (P_{ref} , Q_{ref})

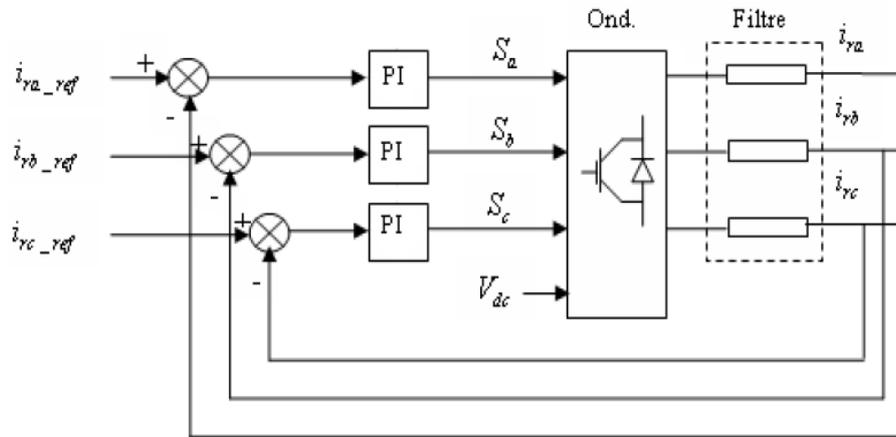


Figure IV.6 : Schéma du principe de contrôle des courants de réseau.

En multipliant les équations du système (IV.10) respectivement par : V_{qrms} et V_{drms} , on aura :

$$\begin{cases} V_{qrms} \cdot P_{ref} = V_{drms} \cdot V_{qrms} \cdot i_{drref} + V_{qrms}^2 \cdot i_{qrref} \\ V_{drms} \cdot Q_{ref} = V_{qrms} \cdot V_{drms} \cdot i_{qrref} - V_{drms}^2 \cdot i_{drref} \end{cases} \quad (IV.11)$$

$$\begin{cases} V_{drms} \cdot P_{ref} = V_{drms}^2 \cdot i_{drref} + V_{drms} \cdot V_{qrms} \cdot i_{qrref} \\ V_{qrms} \cdot Q_{ref} = V_{qrms}^2 \cdot i_{qrref} - V_{qrms} \cdot V_{drms} \cdot i_{drref} \end{cases} \quad (IV.12)$$

A partir des systèmes d'équations précédents, on tire les courants de références i_{drref} et i_{qrref} tels que :

$$\begin{cases} i_{drref} = \frac{V_{drms} \cdot P_{ref} + V_{qrms} \cdot Q_{ref}}{V_{drms}^2 + V_{qrms}^2} \\ i_{qrref} = \frac{V_{qrms} \cdot P_{ref} - V_{drms} \cdot Q_{ref}}{V_{drms}^2 + V_{qrms}^2} \end{cases} \quad (IV.13)$$

Calcul des puissances de référence

On calcule la puissance active de référence à partir du bus continu, la puissance réactive de référence étant nulle.

Le but de système de commande est d'injecter au réseau des courants sinusoïdaux.

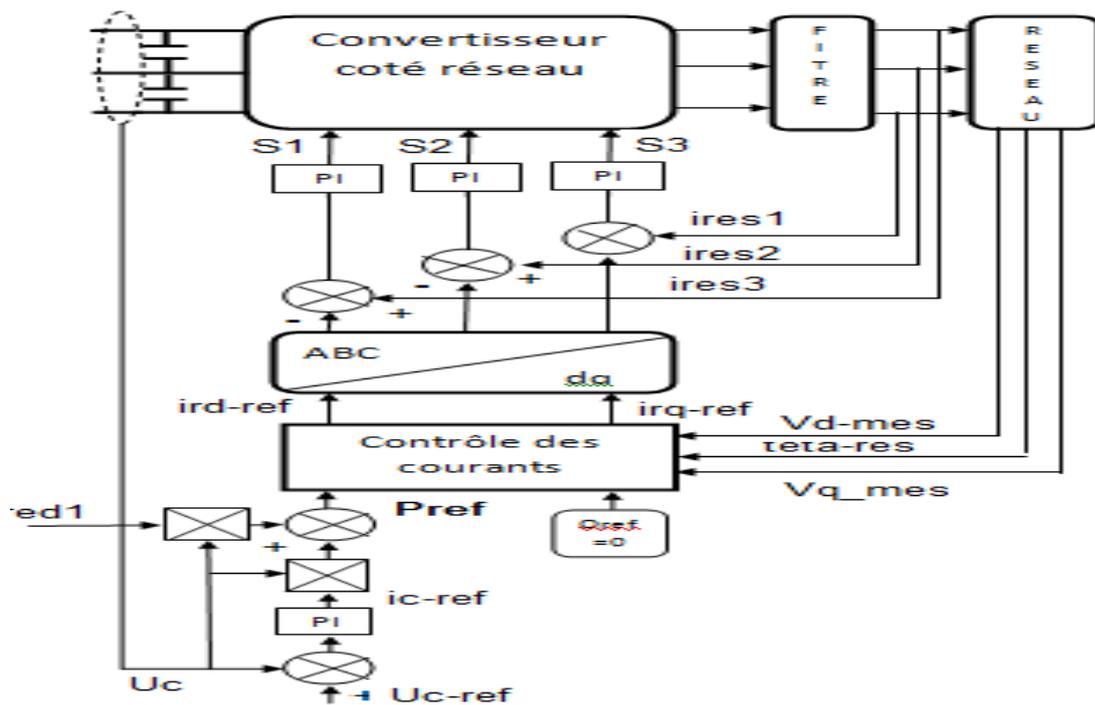


Figure IV.7 : Schéma global du contrôle de la liaison au réseau

IV.3 Simulation

Nous allons procéder à la simulation de la cascade complète telle qu'on commande la machine en puissance active et réactive rotoriques dont le stator est relié directement au réseau, le rotor étant relié à ce dernier par l'intermédiaire d'une cascade redresseur et onduleur triphasés à trois niveaux, le redresseur est commandé en courant en hystérésis et l'onduleur en tension avec la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses.

La valeur efficace du courant de référence I_e qu'on doit imposer se traduit par l'application du principe de la conservation de la puissance en négligeant les pertes Joules, comme suite :

$$3.V_e \cdot I_e \cos \varphi = P_r \Rightarrow I_e = \frac{P_r}{3.V_e \cos \varphi} \quad (\text{IV.14})$$

Avec

$$\cos \varphi = \frac{P_r}{\sqrt{P_r^2 + Q_r^2}} \quad (\text{IV.15})$$

Le profil du vent et la vitesse de rotation qui seront appliqués à notre système sont illustrés sur la figure (IV.4)

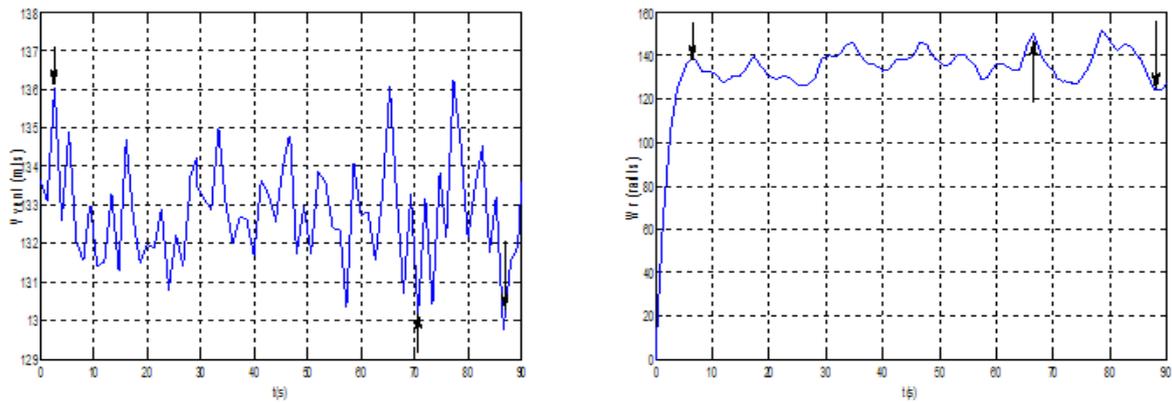
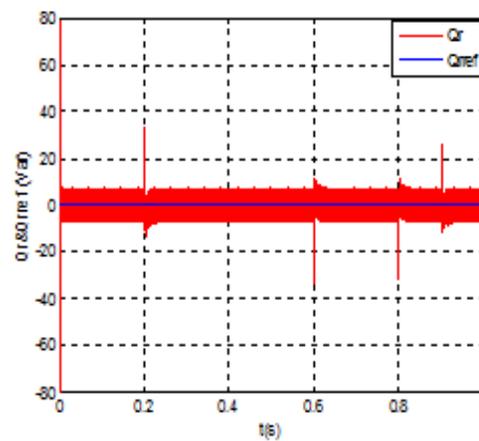
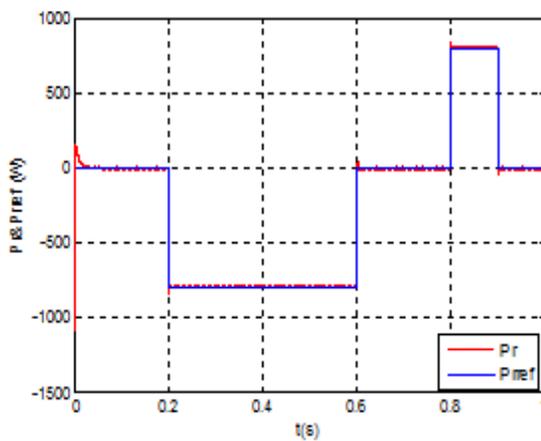


Figure IV.8 : Profil du vent appliqué et vitesse de rotation du rotor

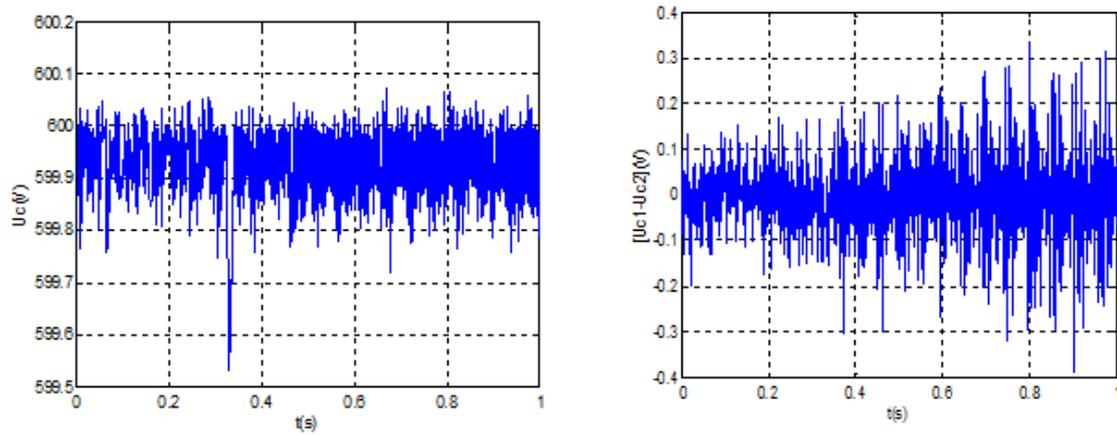
Les conditions d'essai

Nous allons faire des simulations pour deux cas de figures :

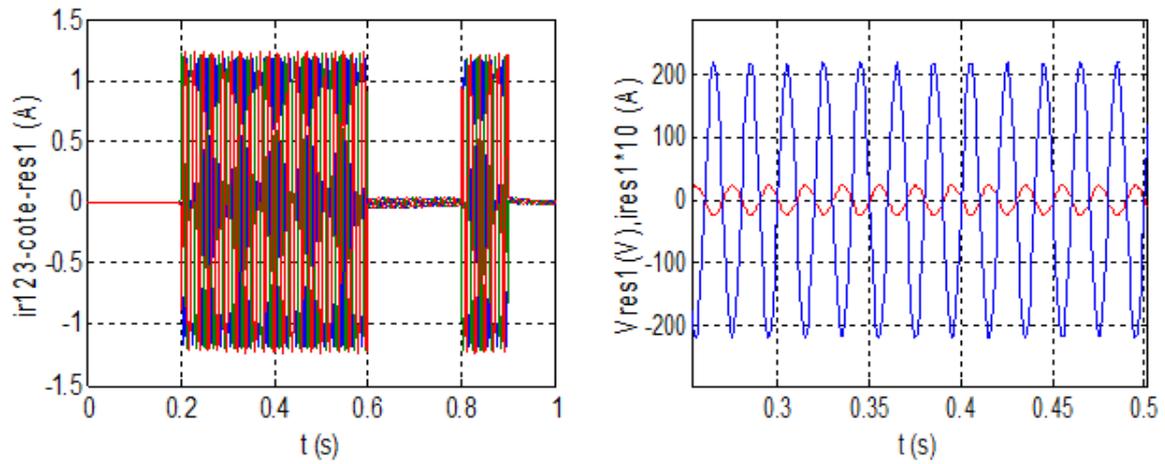
- Premier cas : $\left\{ \begin{array}{l} Q_{rref} = 0 \text{ Var} \\ P_{rref} = \begin{cases} -800 \text{ W} & \text{pour } t \in [0.2, 0.6] \text{ s} \\ +800 \text{ W} & \text{pour } t \in [0.8, 0.9] \text{ s} \end{cases} \end{array} \right.$



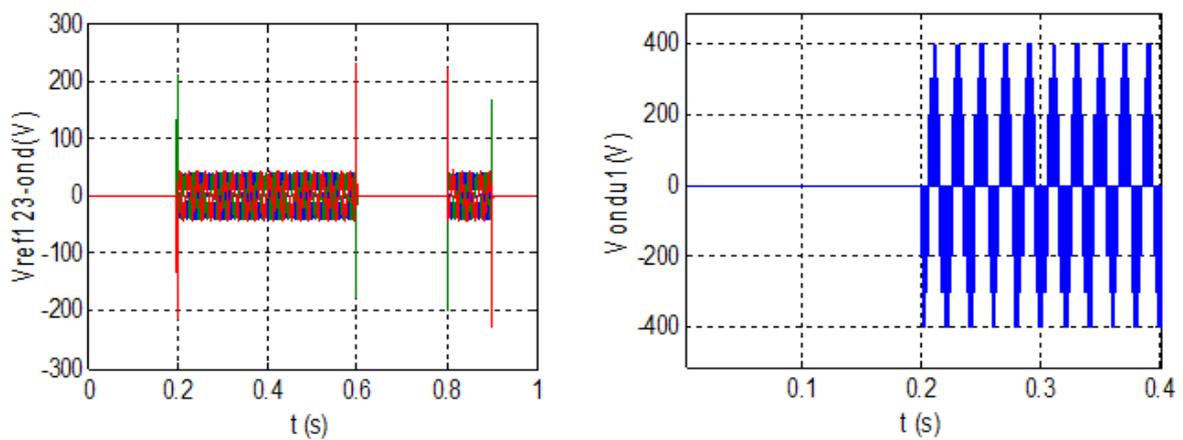
a) Puissances de références et puissances réelles



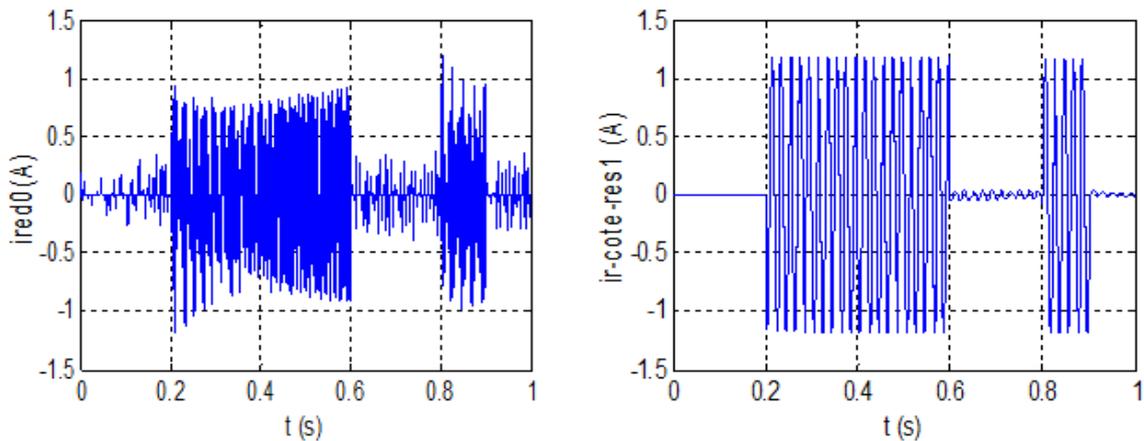
b) Tension du bus continu et différence des tensions



c) Courants côté réseau, tension et courant d'une phase du réseau



d) Tensions de références et tension ondulée d'une phase

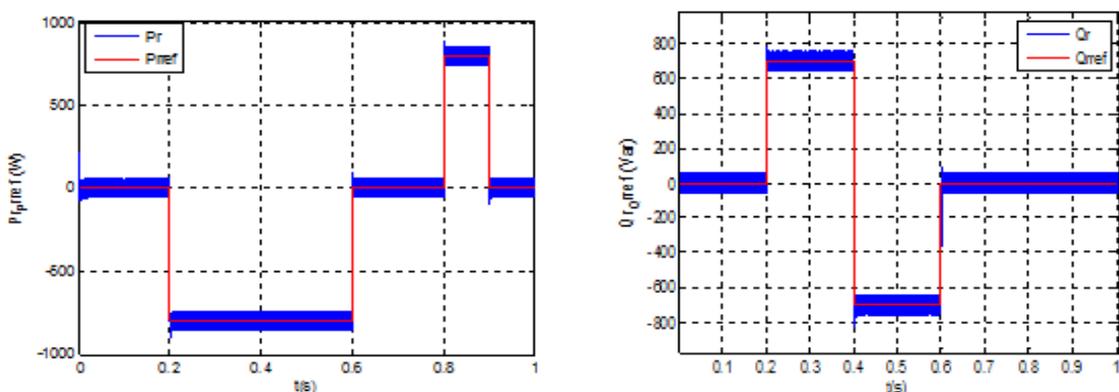


e) Courant redressé i_{red0} , courant rotorique côté réseau d'une phase

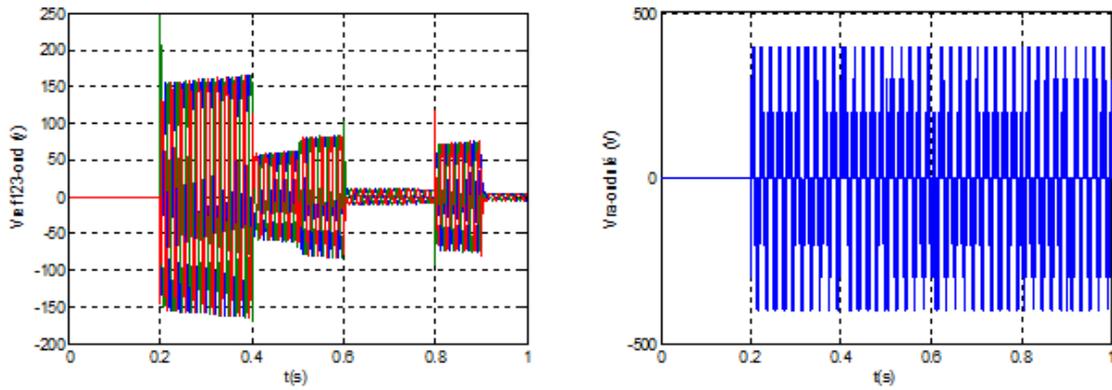
Figure IV.9.a Résultats de simulation de la cascade complète (a,b,c,d,e) avec $Q_{rref} = 0$

Interprétation

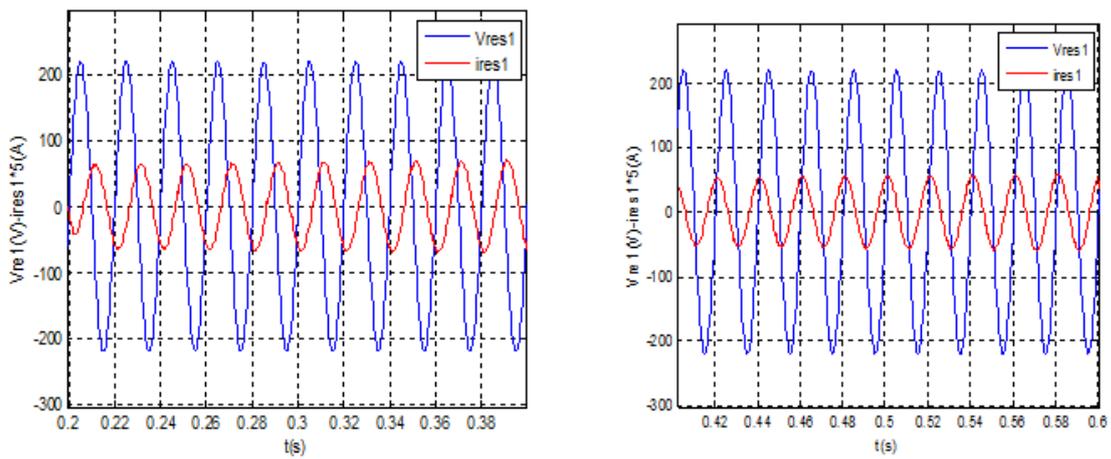
- Pour les caractéristiques de la MADA, on remarque bien que la puissance active et la puissance réactive rotorique suivent parfaitement leurs références,
- Le courant d'une phase rotorique côté réseau présente une sinusoïde de fréquence identique à celle du réseau, ce qui explique que le problème d'adaptation de la fréquence . idem pour les courants des deux autres phases, décalées respectivement de $\frac{2\pi}{3}$ et $\frac{4\pi}{3}$ par rapport à la première phase.
- Une charge continue des deux tensions U_{c1} et U_{c2} pour atteindre chacune une tension d'une valeur autour des 300 V en présence de quelques fluctuations qui n'engendrent pratiquement aucune influence sur la stabilité de la tension du bus totale U_c qui assure l'équilibre de la cascade totale, qui est une tension continue de 600 V.
- La charge continue est la stabilité de la tension continue du bus sont conséquences du bon choix de la valeur efficace imposée des courants de réseau, qui est déterminée par



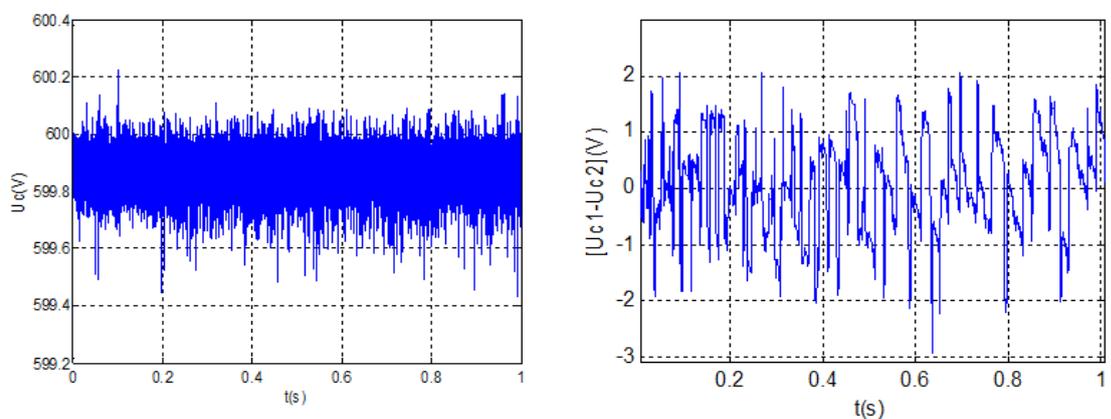
a) Puissances de références et puissances réelles



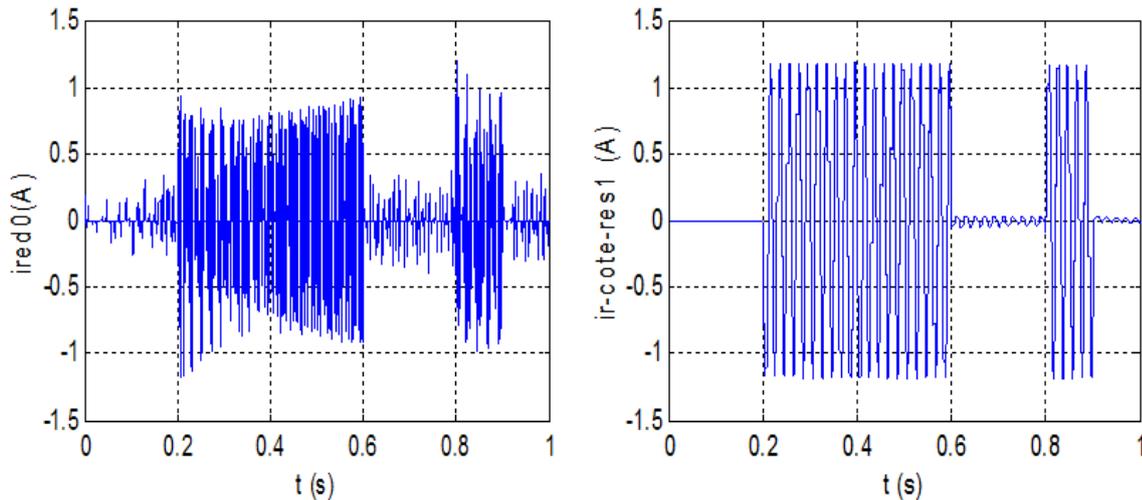
b) Tensions de référence et tension ondulée d'une phase



c) Courants côté réseau, tension et courant de réseau



d) Tension du bus continu et différence des tensions



e) Courant redressé i_{red0} et courant rotorique côté réseau

Figure IV.9.b : Résultats de simulation de la cascade complète (a,b,c,d,e) avec $Q_{rref} \neq 0$.

Interprétation des résultats

Dés qu'on applique un échelon de puissance réactive, on remarque que les courants côté réseau augmentent et suivent bien leur référence mais ils ne sont pas en phase avec la tension du réseau. Cela s'explique par le fait que le facteur de puissance n'est pas unitaire. Pour les caractéristiques de la MADA, on note que les puissances active et réactive rotoriques suivent parfaitement leurs références.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a d'abord présenté le modèle du redresseur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C alimentant une charge active, puis, on a présenté les résultats de simulation de ce redresseur commandé par hystérésis. Ensuite, on a étudié la cascade constituée du redresseur à trois niveaux, de l'onduleur à trois niveaux et la MADA, on a présenté les résultats de simulation.

Dans ce qui suit, et avec la bonne conduite de la MADA avec l'ensemble de la turbine et le convertisseur qui l'ont associé, on abordera le filtrage actif par l'éolienne, qui sera une tâche réalisable du fait qu'on peut utiliser la MADA comme un filtre actif, car elle présente une amplification de puissance entre le rotor et le stator et c'est cette amplification que l'on veut pour mettre en place un filtre actif à partir du rotor de la machine.

Chapitre V:
Filtrage actif par l'éolienne

V.1 Qualité de l'énergie électrique

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs, une énergie de qualité, sous la forme de trois tensions sinusoïdales parfaites constituant un réseau triphasé équilibré.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier. Les origines de ces altérations ont nombreuses ; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques pacifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers.

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

- La forme d'onde
- L'amplitude des trois tensions
- La symétrie
- La fréquence

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique. Afin de décrire certaines perturbations et de donner le niveau de conformité de l'énergie fournie, des normes internationales ont déjà été établies [31].

V.2 Filtrage

Aujourd'hui les réseaux électriques sont loin d'être à l'abri des perturbations, car ils sont appelés à fonctionner sous un environnement de plus en plus agressif, ces perturbations peuvent être d'origines interne comme les perturbations sur l'amplitude ou les valeurs efficaces, le déséquilibre du système triphasé, les distorsions harmoniques ou bien d'origines externe comme les charges polluantes, alors que leur objectif principal est de fournir aux clients de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous une forme de tension sinusoïdale avec des valeurs d'amplitude et de fréquence fixes.

Plusieurs solutions ont été proposées pour résoudre le problème de la pollution harmonique des réseaux électriques, le filtrage actif, figure parmi ces propositions et que ses applications et ses utilisations dans l'industrie sont d'importantes grâce à ses avantages et ses contributions à limiter les perturbations en sujet, en effet, ce type de filtrage est auto adaptatif et ne nécessite pas la connaissance à priori des caractéristiques du réseau et de la charge .

V.2.1 Compensation des harmoniques par un filtre parallèle

On cherche à limiter la pollution harmonique présente sur un réseau électrique, pour cela on dispose généralement de quatre solutions [29] :

➤ **Réduire l'impédance de court-circuit**

Pour diminuer la perturbation harmonique globale, on augmente la puissance de court-circuit. Toutefois, cette solution n'est pas envisageable car on ne peut pas augmenter la puissance de court-circuit pour des considérations économiques.

➤ **Modification du convertisseur polluant**

Soit en changeant sa structure /ou sa commande.

➤ **Utilisation des filtres passifs**

Un filtre passif est un circuit d'éléments passifs (LC) connecté en parallèle avec une charge non linéaire, il empêche les courants harmoniques produits par cette charge de se propager sur le reste du réseau.

➤ **Filtrage-actif**

Cette solution consiste à utiliser un convertisseur de puissance (onduleur, redresseur machine asynchrone,...), qui injecte au réseau électrique des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Ainsi, le filtre s'adapte en permanence aux courants harmoniques présents sur le réseau et permet une compensation de toutes les harmoniques.

V.3 Principe d'utilisation de l'éolienne comme un filtre actif

L'éolienne peut être utilisée comme un filtre actif, car sa commande est effectuée par un convertisseur statique (Onduleur). En plus la machine asynchrone présente une amplification de puissance entre le rotor et le stator. C'est cette amplification que l'on veut utiliser pour mettre en place un filtre actif à partir du rotor de la machine asynchrone [28],[29],[30].

La figure (V.1) montre la structure permettant de filtrer les harmoniques de courant générés par des charges polluantes connectées au réseau.

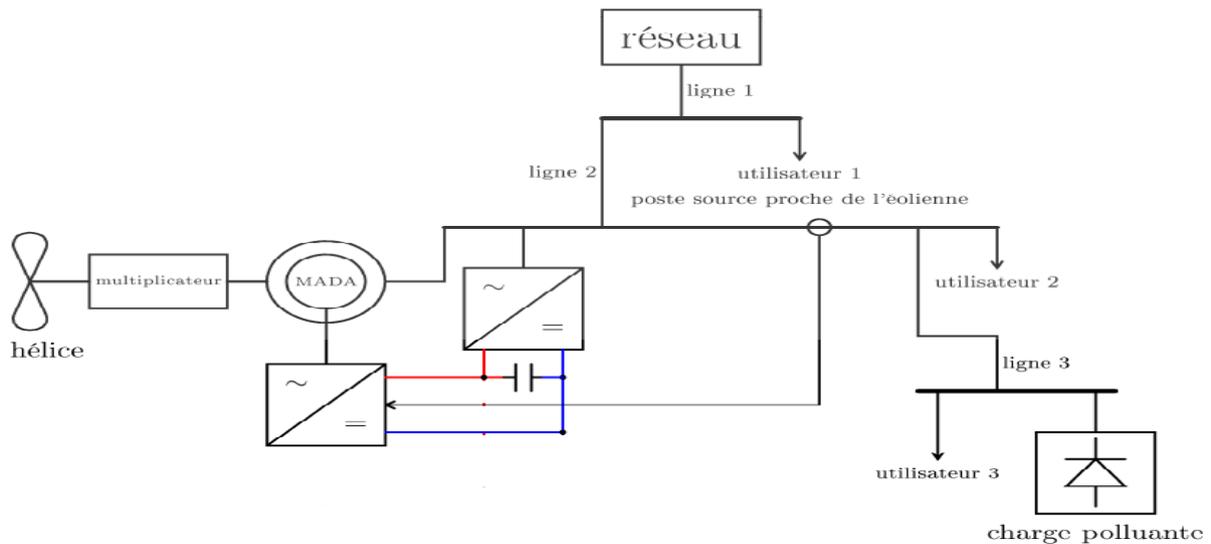


Figure V.1 : Schéma du système éolien avec filtrage par la MADA

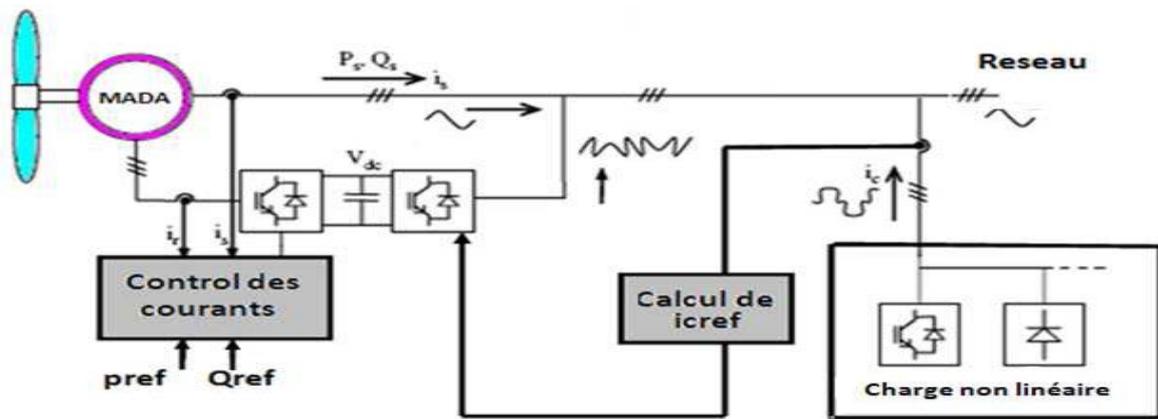


Figure V.2: Schéma de principe du filtrage actif avec la MADA

V.3.1 Identification des courants harmoniques

L'identification des courants harmoniques absorbés par la charge polluante (non linéaire) est nécessaire pour faire notre démarche de filtrage qui est basée sur notre machine à double alimentation (MADA).

La méthode d'identification la plus utilisée est appelée « Méthode des puissances réelle et imaginaire », cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour ces raisons, nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre travail [30].

V.4 Méthode des puissances réelle et imaginaire en utilisant la transformation de Park

V.4.1 Calcul des différentes composantes de tension et de courant de la charge non linéaire

Les composantes de courants et de tensions dans le repère fixe de Concordia s'écrivent :

$$\begin{pmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{pmatrix} \quad (\text{V.1})$$

$$\begin{pmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{pmatrix} \quad (\text{V.2})$$

Le passage du repère de Concordia vers le repère de Park :

$$\begin{pmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{pmatrix} \quad (\text{V.3})$$

$$\begin{pmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{pmatrix} \quad (\text{V.4})$$

Les expressions des puissances active et réactive dans le plan de Park restent invariantes, alors :

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{sd} & v_{sq} \\ v_{sq} & -v_{sd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{pmatrix} \quad (\text{V.5})$$

$$\text{D'où} \quad \begin{pmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{pmatrix} = \frac{1}{v_{sd}^2 + v_{sq}^2} \begin{pmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} \quad (\text{V.6})$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{cases} p = p_c + p_h \\ q = q_c + q_h \end{cases} \quad (\text{V.7})$$

En remplaçant le système (V.7) dans le système (V.6), on obtient le système suivant :

$$\begin{pmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \underbrace{\begin{pmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{pmatrix}}_{\text{Courant actif}} \begin{pmatrix} p_c \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{\Delta} \underbrace{\begin{pmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{pmatrix}}_{\text{Courant réactif}} \begin{pmatrix} 0 \\ q_c \end{pmatrix} + \frac{1}{\Delta} \underbrace{\begin{pmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{pmatrix}}_{\text{Courant harmonique produit par les charges non linéaires et le déséquilibre}} \begin{pmatrix} p_h \\ q_h \end{pmatrix} \quad (\text{V.8})$$

Courant actif

Courant réactif

Courant harmonique produit par les charges non linéaires et le déséquilibre

Avec : $\Delta = v_{sd}^2 + v_{sq}^2$

Le système (V.8) nous donne la possibilité de compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux.

Le tableau (V.1) résume les modes de compensation possibles.

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive
Paramètre de contrôle	$p_f = p_h$ $q_f = q_h$	$p_f = 0$ $q_f = q_c$	$p_f = p_h$ $q_f = q_c$

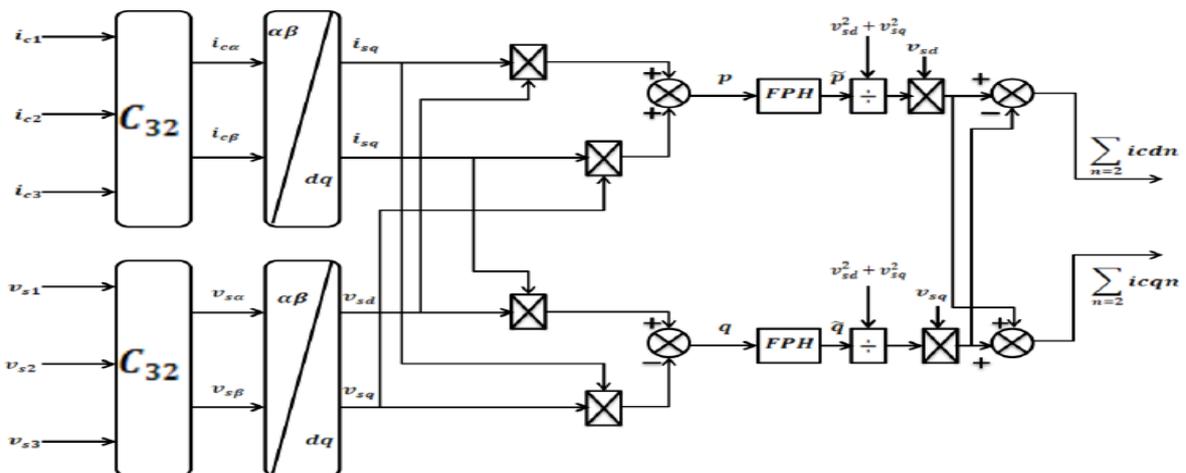
Tableau(V.1) : Calcul des courants harmoniques

Si nous voulons compenser les harmoniques de courant, les courants harmoniques de référence i_{cdn} et i_{cqn} sont obtenus comme suite :

$$\begin{pmatrix} i_{cdn} \\ i_{cqn} \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_h \\ q_h \end{pmatrix} \quad (V.9)$$

Les caractéristiques de la méthode des puissances instantanées sont :

- Elle est applicable uniquement pour les systèmes triphasés.
- On peut l'appliquer à tout type de système triphasé équilibré ou déséquilibré, avec ou sans harmoniques.
- Un bon temps de réponse dynamique, car elle est basée sur des valeurs instantanées.
- Le nombre d'harmoniques compensés dépend de la bande passante des semi-conducteurs constituant l'onduleur du filtre actif.
- Méthode de calcul simple.



Figure(V.3) : Méthode des puissances réelle et imaginaire en utilisant la transformation de Park.

V.5 Application du filtre actif par l'éolienne à la charge non linéaire

Dans cette partie, on va prendre un redresseur triphasé à base de thyristors comme une charge polluante. Pour avoir une bonne identification des harmoniques, il faut modéliser la charge polluante (redresseur).

V.5.1 Modélisation de la charge polluante

La charge polluante est un redresseur triphasé à thyristors considéré comme une source de courant triphasé parfaite (les semi-conducteurs sont supposés parfaits), cette dernière génère des harmoniques de courant et absorbe de l'énergie réactive.

Le courant circulant dans la phase 1 ($i_{c1}(t)$) est donné par le système d'équations (V.10):

$$\begin{cases} +I_c & \text{si } \frac{\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \leq \theta \leq \frac{5\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \text{ et si } \frac{11\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \leq \theta \leq \frac{12\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \\ \mathbf{0} & \text{si } \alpha + 2k\pi \leq \theta \leq \frac{\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \text{ et si } \frac{5\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \leq \theta \leq \frac{7\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \\ -I_c & \text{si } \frac{7\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \leq \theta \leq \frac{11\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \end{cases} \quad (\text{V.10})$$

Avec : $\begin{cases} \alpha : \text{angle d'amorçage} \\ \theta = \omega t \end{cases}$

Pour les deux autres courants, il suffit de décaler i_{c1} respectivement de $(\frac{2\pi}{3})$ et $(\frac{4\pi}{3})$.

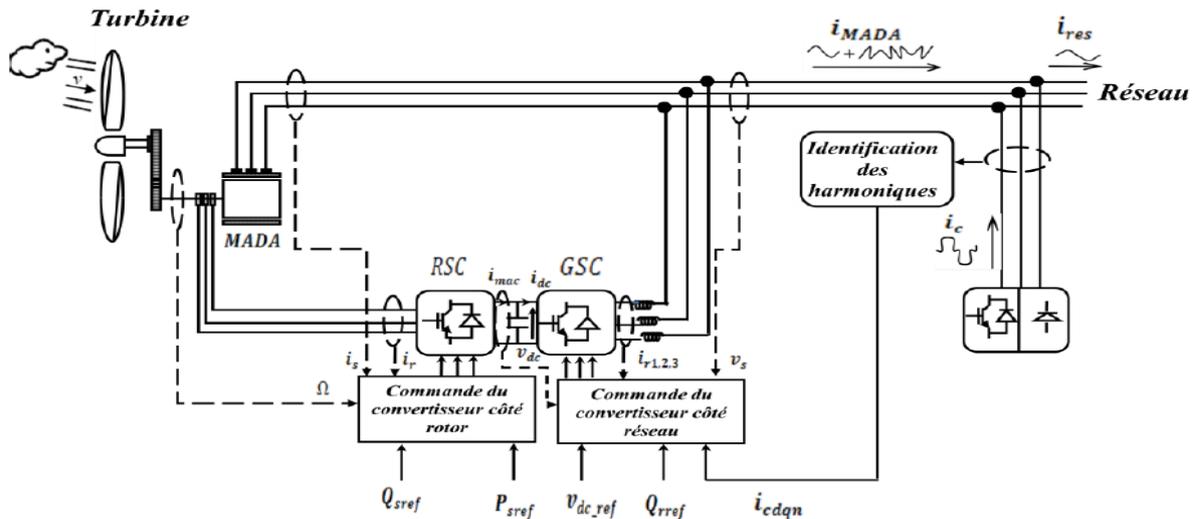
V.6 Filtrage actif convertisseur côté réseau

V.6.1 Principe de fonctionnement

La MADA dans ce système est pilotée par le rotor par l'intermédiaire d'une cascade basée sur deux convertisseurs à trois niveaux commandés en M.L.I, de plus, la topologie du convertisseur côté réseau nous permettra de l'utiliser comme un filtre actif parallèle.

La figure (V.4) montre la structure de système de filtrage actif par le convertisseur côté réseau.

On commande le convertisseur de la MADA côté réseau afin qu'il produit un courant sinusoïdal correspondant à la puissance qu'elle doit produire et un courant harmonique, correspondant au courant harmonique de la charge polluante. Par conséquent, au niveau du raccordement de l'éolienne et de la charge polluante, la somme des courants donne une onde de courant sinusoïdale vue de réseau qui se retrouve ainsi dépolluée.



Figure(V.4) : Schéma de principe de filtrage actif par convertisseur côté réseau.

V.6.2 Commande en courant du convertisseur côté réseau dans le repère d-q

La structure de commande (IV-7) présentée dans le chapitre précédent montre la régulation des courants de réseau. Les boucles en courant s'effectuent sur les deux axes d et q. pour cela, il sera aisé d'y ajouter les courants harmoniques de références par simple addition des courants. Ainsi nous obtiendrons les puissances et les courants harmoniques désirés à compensés [29].

La structure de commande est donnée par la figure(V.5) :

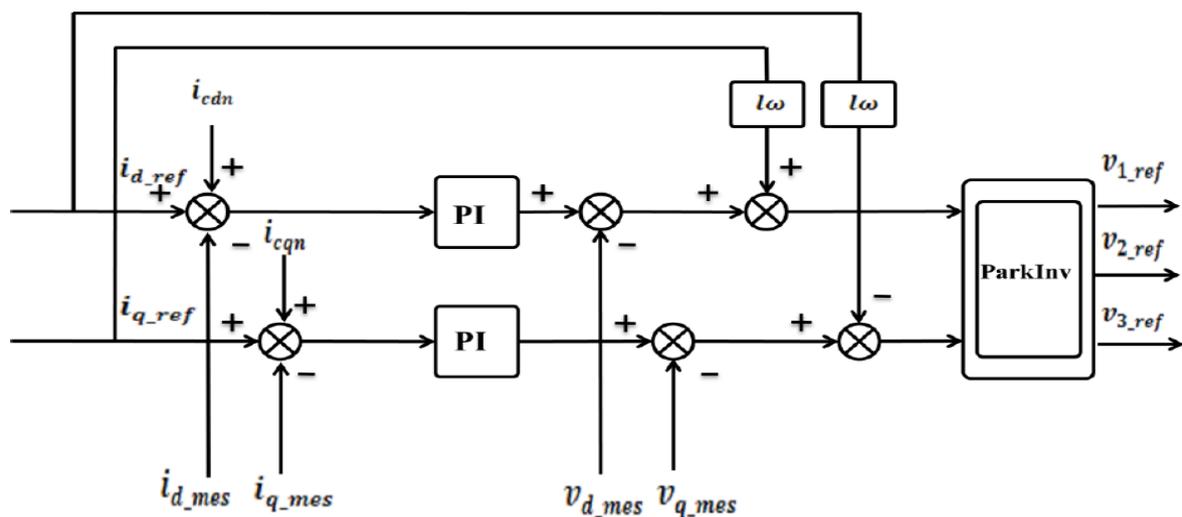


Figure V.5 : La boucle de régulation des courants avec les références harmoniques.

Les courants totaux générés par le convertisseur côté réseau sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{dtotal} = i_d + i_{cdnr} \\ i_{qtotal} = i_q + i_{cqnr} \end{cases} \quad (V.11)$$

V.7 Simulation et interprétation

La charge non linéaire est un redresseur triphasé à thyristors alimentant une charge (R-L) avec :

$$\begin{cases} \alpha = 30^\circ \\ R = 80\Omega \\ L = 600mH \end{cases}$$

Conditions d'essai :

- Le même profil du vent imposé au premier chapitre sera appliqué à notre machine.
- La tension du bus continu $U_c = 600V$.
- Convertisseur côté réseau : $f_p = 1.2kHz$ et l'amplitude $A_p = 400V$.
- Convertisseur côté rotor : $f_p = 1.2kHz$ et l'amplitude $A_p = 400V$.
- Le filtrage est appliqué dans l'intervalle $[0.3 ; 0.7]s$.

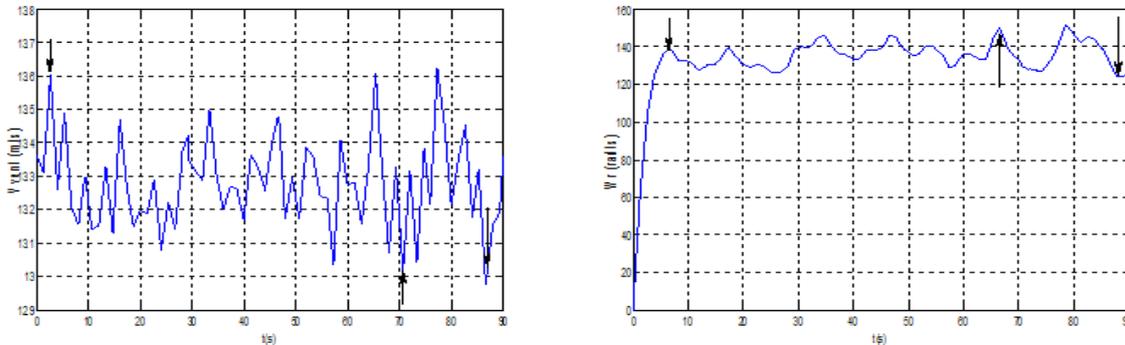
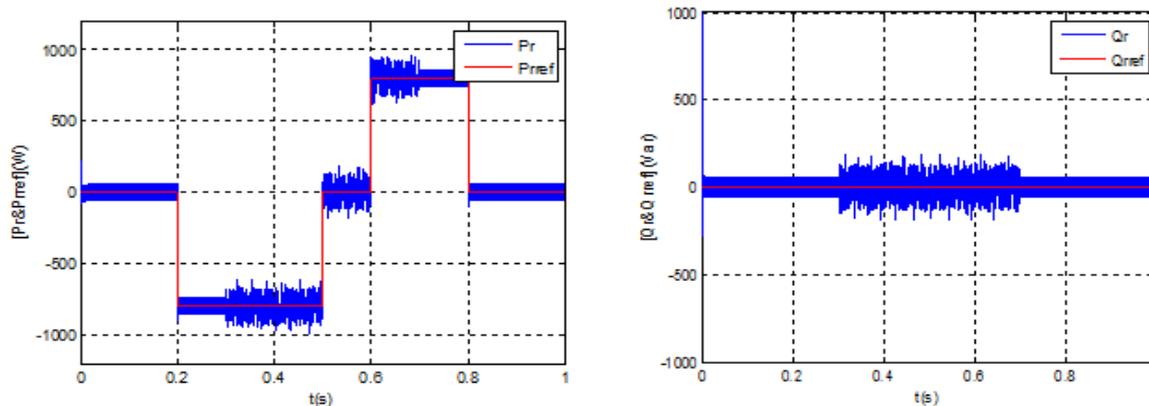
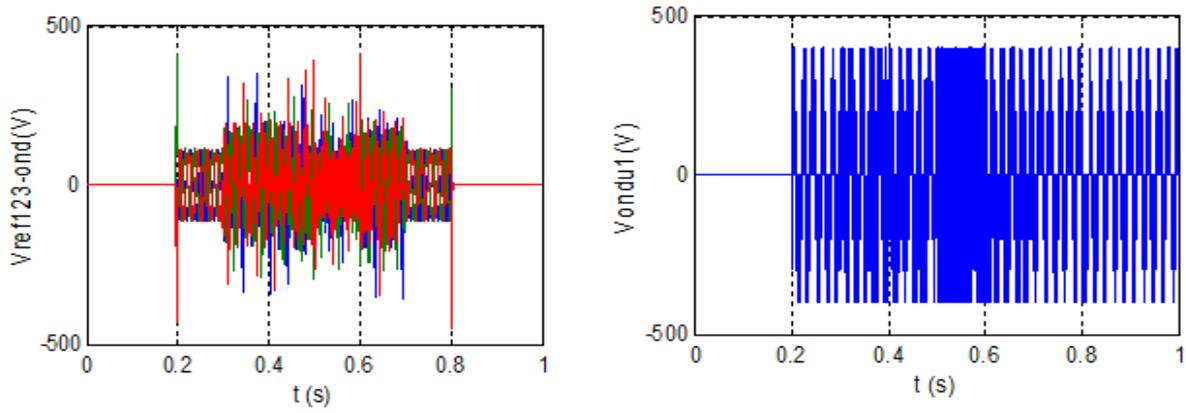


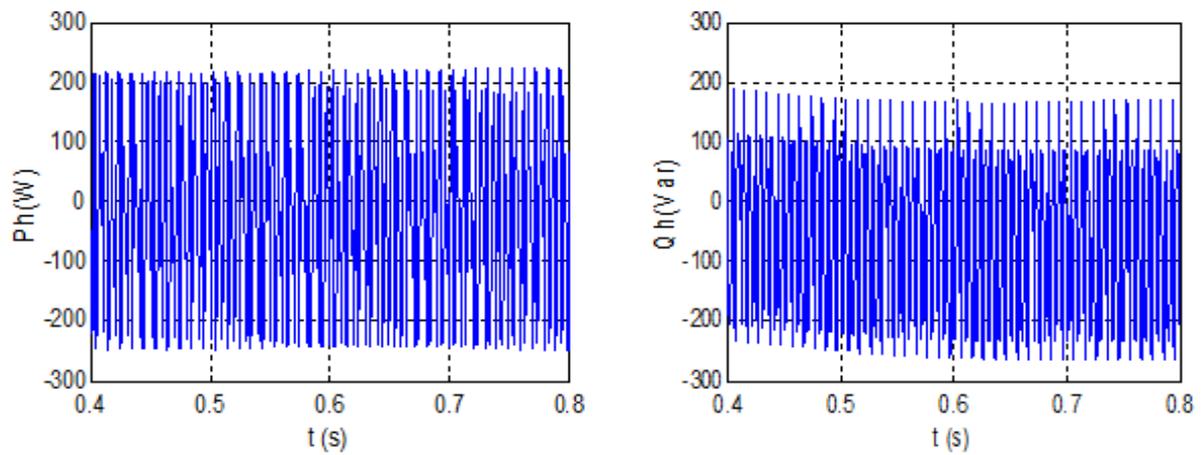
Figure I.16 Profil du vent imposé et vitesse de rotation de la machine



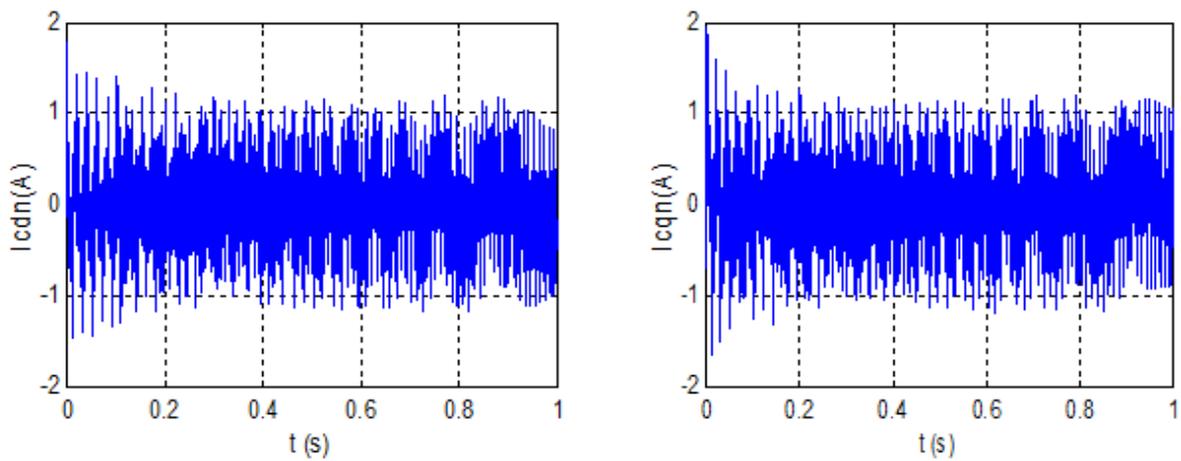
a) Puissances de référence et puissances réelles rotoriques



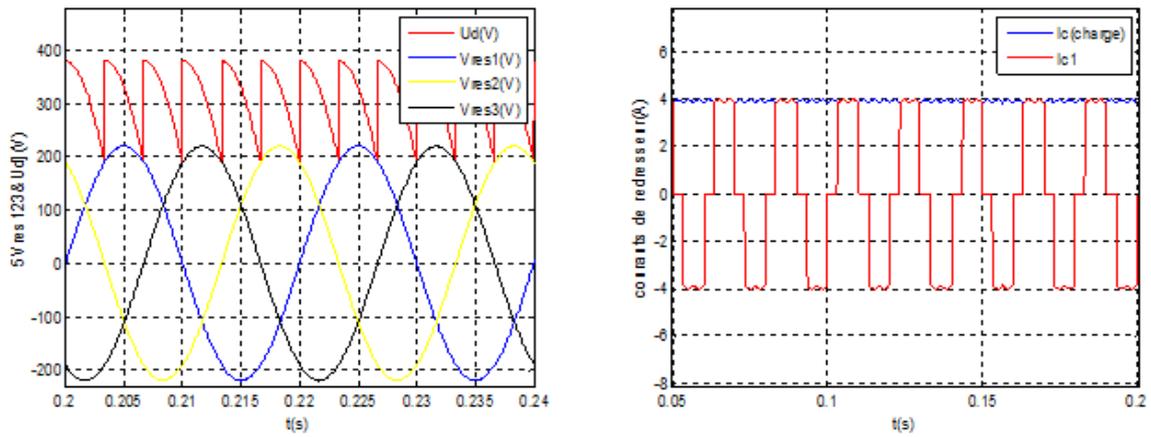
b) Tensions de référence et tension réelle de l'onduleur



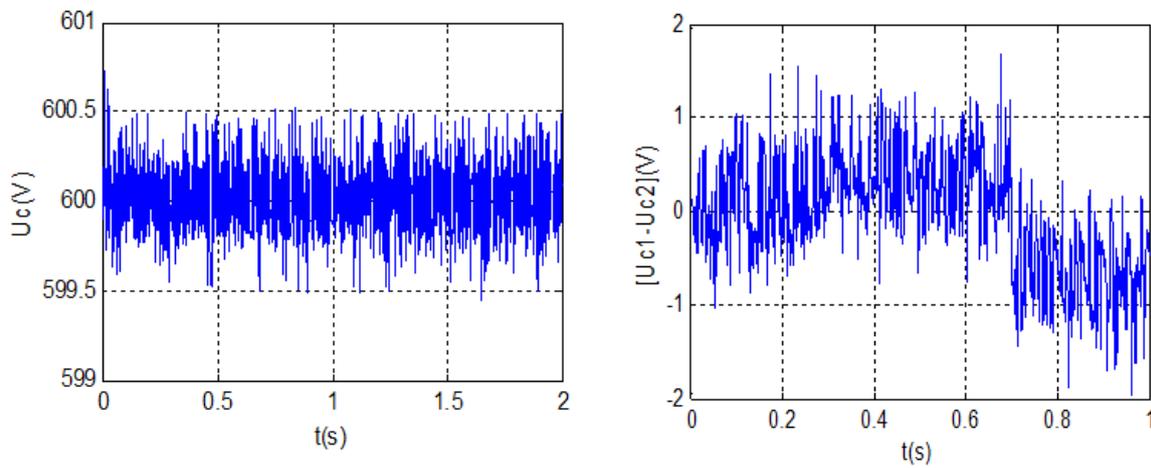
c) Puissances de la charge polluante



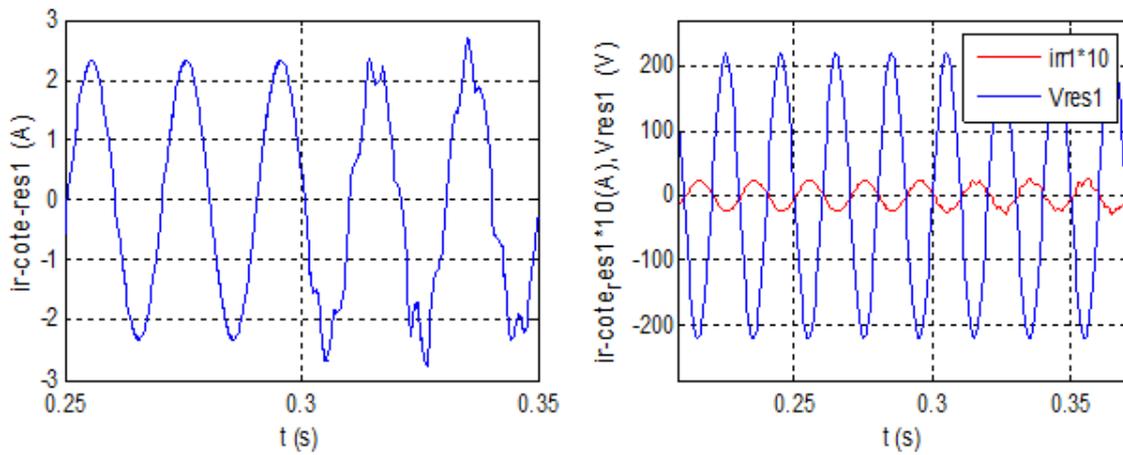
d) Courants de la charge polluante



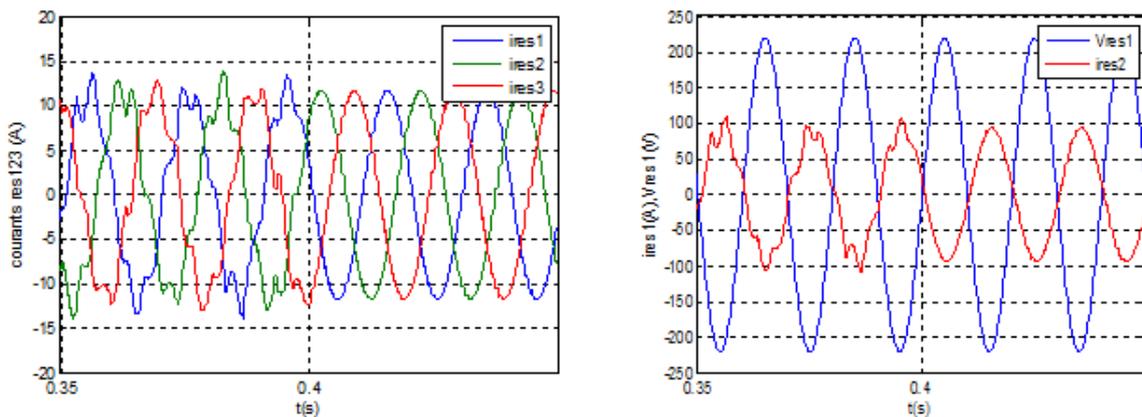
e) Tensions du réseau et courants du redresseur



f) Tension du bus continu et la différence des tensions



g) Courant rotorique côté réseau, tension de réseau et courant rotorique côté réseau



h) Courants de réseau, courants et tension d'une phase du réseau

Figures V.6: Simulation du filtrage actif par éolienne cas d'une charge polluante non linéaire (Redresseur triphasé à thyristors) (a,b,c,d,e,f,g,h)

Interprétation des résultats

- Après identification des courants harmoniques par la méthode de la puissance réelle et imaginaire, le convertisseur côté réseau génère un courant sinusoïdal et un courant harmonique, ce dernier est identique et en opposition de phase à celui absorbé par notre charge polluante non linéaire.
- L'utilisation de la MADA comme filtre actif est intéressante car elle ne modifie pas la structure de commande de la MADA et donc n'entraîne pas de modifications de l'ensemble de système (cascade).
- La MADA est capable de compenser la pollution harmonique sans modification de son fonctionnement, en effet, on remarque que les puissances rotoriques suivent les références même lors de l'application du filtrage actif.
- La tension du bus continu se stabilise à la valeur voulue ($\approx 600V$), même lors de l'application du filtrage.
- Le comportement des courants côté réseau et ceux du réseau montre l'efficacité de la méthode d'identification des harmoniques utilisée.
- Le filtrage actif n'a pas affecté le facteur de puissance.

V.8 Filtrage d'une charge linéaire déséquilibrée

Cette fois-ci, on va remplacer le pont redresseur à thyristor par une autre charge déséquilibrée mais linéaire, et on va appliquer la même procédure que précédemment pour réaliser l'opération de filtrage actif par l'éolienne.

Lorsqu'au moins l'une des tensions ou des courants triphasés du réseau diffèrent des deux autres en amplitude et/ou en phase, on dit que notre système est déséquilibré. Dans le cadre de notre étude, le déséquilibre des courants est provoqué par une charge triphasée déséquilibrée connectée au réseau [28], [24].

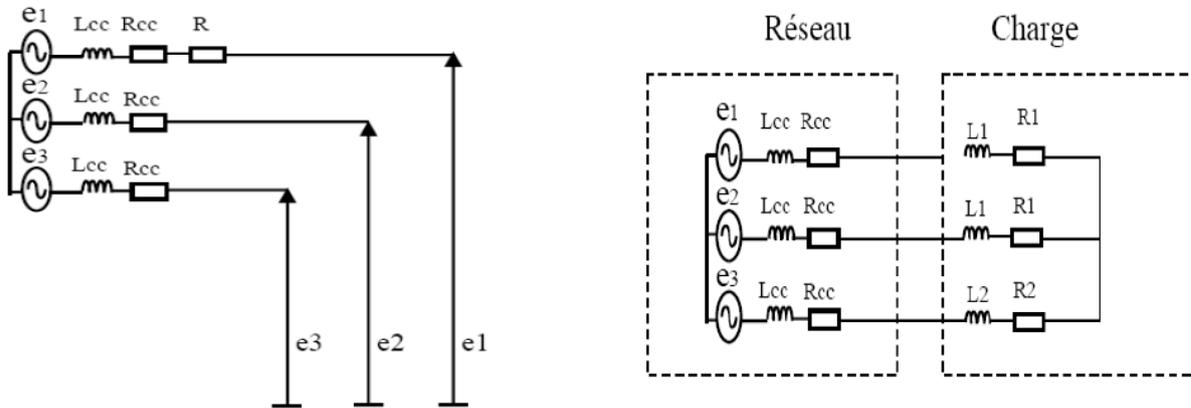


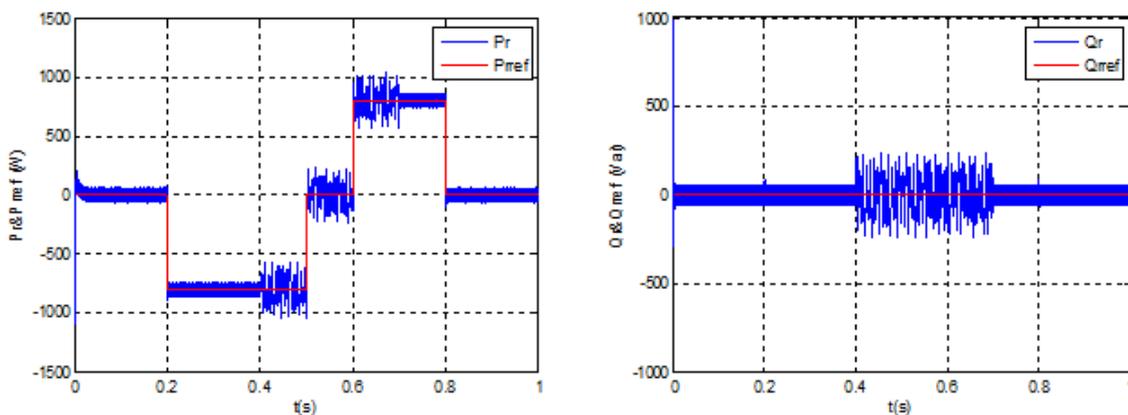
Figure V.5: Déséquilibre de la charge

On a utilisé le même algorithme de filtrage de la charge polluante pour identifier les harmoniques et rééquilibrer le réseau.

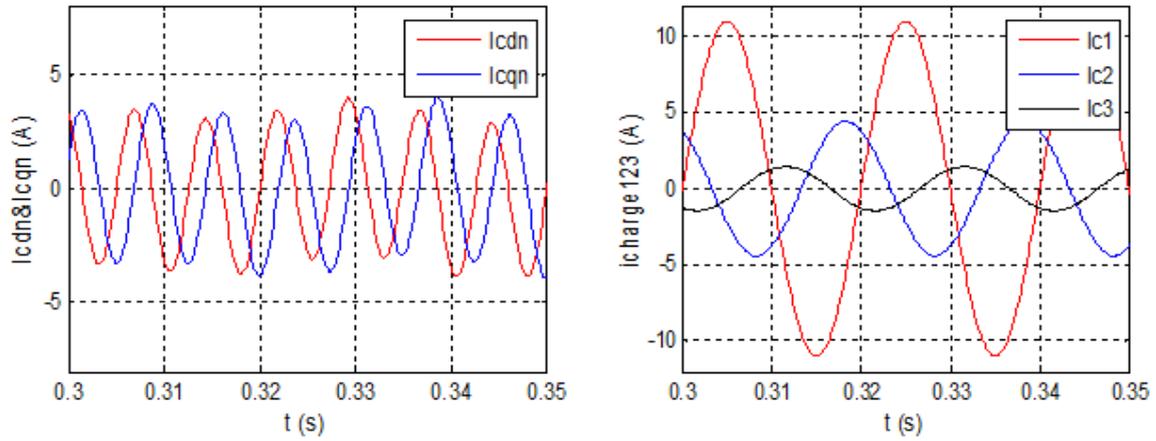
➤ **La charge linéaire**

$$\begin{cases} R_1 = 20\Omega ; L_1 = 0.9mH \\ R_2 = 50\Omega ; L_1 = 0.9mH \\ R_3 = 100\Omega ; L_1 = 0.9mH \end{cases}$$

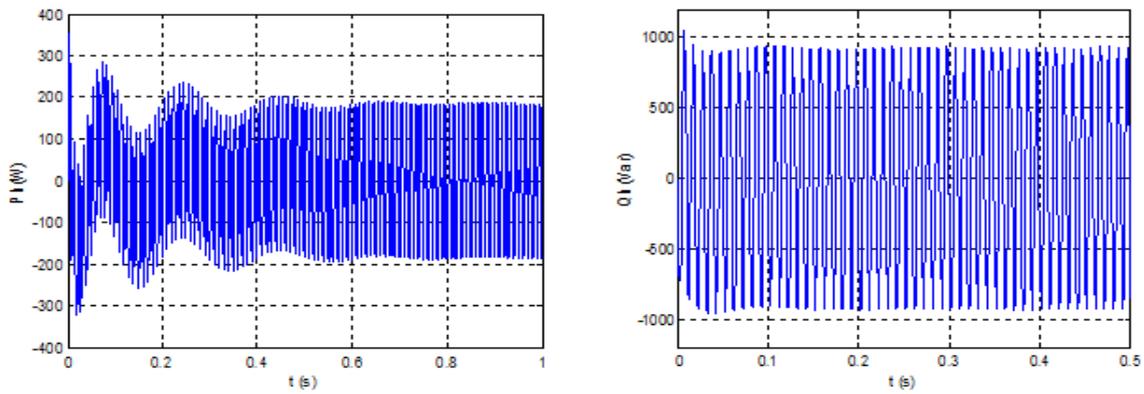
V.8.1 Résultats de simulation



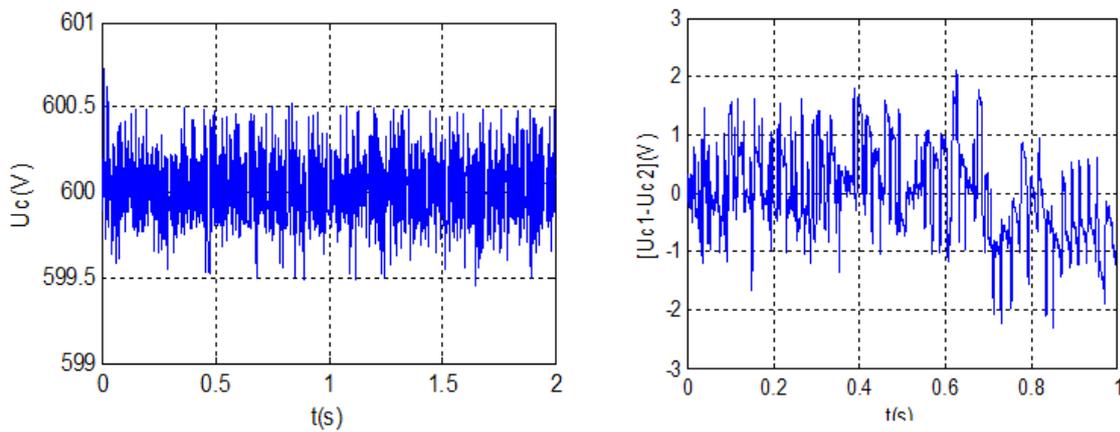
a) Puissances de référence et puissances réelles rotoriques



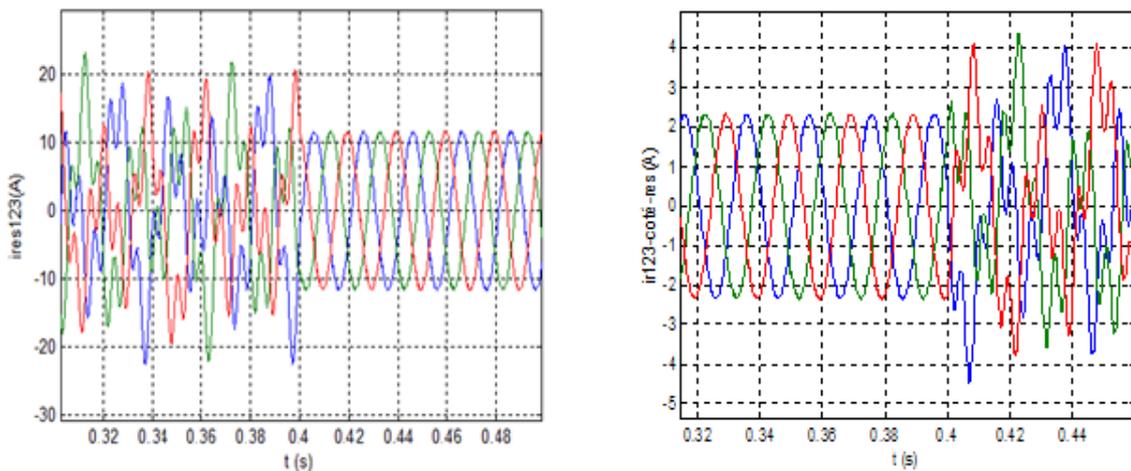
b) Courants de la charge déséquilibrée et courants de charge



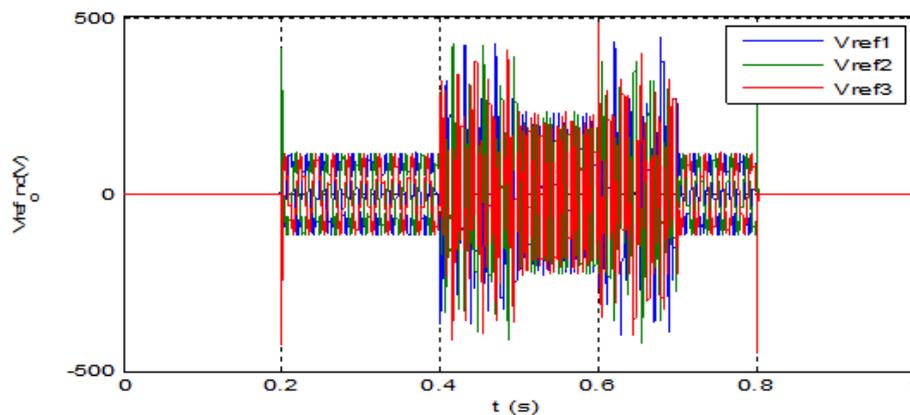
c) Puissances de la charge déséquilibrée



d) Tension du bus continu et la différence des tensions



e) Courants de réseau, courants rotoriques côté réseau



f) Tensions de référence

Figure V.6: Résultats de simulation de filtrage du déséquilibre d'une charge linéaire (a,b,c,d,e,f).

Interprétation

D'après les résultats de simulation on constate que :

- Un bon suivi de consigne pour les puissances active et réactive rotoriques même après la compensation de déséquilibre.
- La tension du bus continu suit toujours sa référence, avec des ondulations restent acceptable même après de compensation de déséquilibre.
- Il est clair que la puissance de déséquilibre due à la charge linéaire est compensée par le convertisseur côté réseau.
- Les courants de réseaux qui étaient déséquilibrés, deviennent équilibrés, et les courants côté réseau qui était équilibrés, deviennent déséquilibrés. donc notre système joue son rôle de compensateur de déséquilibre.

Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à réduire la pollution harmonique produite par la charge polluante non linéaire et une charge triphasée déséquilibrée linéaire et à concevoir une commande qui permette un contrôle des puissances active et réactive, s'écoulant entre la machine et le réseau, sur lequel est raccordée une fonction de filtrage actif.

Pour l'identification des courants harmoniques, nous avons présenté la méthode classique des puissances réelle et imaginaire instantanées.

Le système éolien-filtre actif étudié est capable de filtrer les courants harmoniques et compenser la puissance réactive sans modification de son fonctionnement standard.

Basons sur les avantages d'un tel système éolien, ce dernier permettra d'augmenter encore les services systèmes pour les réseaux électriques en faisons de ce système éolien un moyen d'intervenir quand c'est demandé et nécessaire d'insérer et d'implanter des dispositifs améliorants de plus en plus la qualité des réseaux électriques.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif de ce projet était l'étude d'une chaîne de production d'énergie électrique. Cette chaîne étant constituée de plusieurs éléments, nous avons étudié chacun séparément.

En premier lieu, nous avons fait la modélisation d'une turbine intégrant un système, basé sur la technique MPPT, qui permet l'extraction du maximum de puissance. Nous avons en suite, modélisé la machine asynchrone à double alimentation. On a constaté que le modèle d'état est non linéaire.

Une commande vectorielle a été utilisée afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le rotor de la machine et le réseau. Après, vient l'étude d'un convertisseur de fréquences constitué d'un redresseur et onduleur triphasés à trois niveaux. L'onduleur est commandé en utilisant la technique M.L.I triangulo-sinusoïdale, ce qui permet de minimiser l'effet des harmoniques. La commande du redresseur est basée sur la technique d'hystérésis en courant, cette dernière a permis d'avoir un courant côté réseau pratiquement sinusoïdal.

Nous avons ensuite étudié la cascade complète regroupant la turbine, la MADA, le redresseur et l'onduleur. Grâce à ce système, la forme de la tension et du courant fournies au réseau est sinusoïdale.

La dernière partie a fait l'objet de filtrage actif par l'éolienne, en effet : notre système éolien basé sur la MADA alimentée par une cascade de deux convertisseurs statiques, a permis de filtrer et d'atténuer les harmoniques de courants absorbés par des charges polluantes, ainsi, on a pris deux types de charges en sujet : la première était un redresseur triphasé qui est une charge non linéaire et on a appliqué notre système de filtrage qui a réussi à nettoyer le réseau de la pollution harmonique. La deuxième était une charge triphasée linéaire déséquilibrée, du même, l'opération de filtrage par l'éolienne a contribué à palier à ce déséquilibre rendant ainsi le réseau à l'abri de perturbations.

Face à ces observations et les résultats obtenus, des perspectives intéressantes envisageables pour améliorer le fonctionnement de notre système de production d'énergie électrique :

- L'application des convertisseurs de niveaux supérieurs.
- Amélioration de la stabilité des tensions du bus continu, par exemple en lui associant le pont de Clamping ou une technique de stockage.
- L'étude de l'influence de la production d'énergie éolienne sur le réseau électrique.

Bibliographie

Matlab/Simlink/R2007/bin/win32.

- [1] Thomas Ackermann , « Wind power in power system », Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2005.
- [2] A. Mirecki, « Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Énergie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance », thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [3] Désiré Le Gouriere, « Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations », édition Eyrolles, 1982.
- [4] Frederic Poitiers, « Etude et Commande des Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Énergie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [5] Y.Bencherif, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)», projet de fin d'études, ENP, 2008.
- [6] O . De Vries , « ON the theory of the horizontal axis wind turbine », Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [7] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Eoliennes », Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [8] Hingorani, N. G.High « Power Electronics wind », IEEE Power Engineering Review, pp. 3-4, July 1988.
- [9] Nick Jenkins &Coll, « Electrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération ».
- [10] Jean-Christian Lhomme, « Les énergies renouvelables ».
- [11] Corinne Dubois, « Le guide de l'éolien, techniques et pratiques ».
- [12] F.Merrahi, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à double alimentation (Application à l'énergie éolienne)», thèse de magistère, ENP, 2007.
- [13] Michel Pluiose, « Conversion d'énergie par turbomachines : Eoliennes, turbines à gaz, cogénération, cycles combines gaz-vapeur... »
- [14] Khettache Laid, «Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée », thèse de Magistère, Université de Batna, 2007.
- [15] Bernard Multon, Equipe SETE «Aérogénérateurs électriques », Master recherche STS IST SPEE Paris11-ENS Cachan 2009, Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [16] EDF, «L'énergie éolienne »,2007.
- [17] B .François, «Intégration de l'énergie éolienne au réseau », Séminaire «Le développement des énergies éoliennes en Tunisie»,19 Novembre 2009.
- [18] M. Machmoum, F. Poitiers, L. Moreau et M.E. Zaim, R. Le.Doeuff,«Etude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS,MADA) »,Université de NANTES.
- [19] Paul-Etienne Vidal, «Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique de TOULOUSE, 2004.
- [20] 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 Multiniveaux». Thèse de doctorat, C.N.A.M, PARIS 1995.

- [21] Salma El Aïmani, «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse Doctorat, Ecole Centrale de LILLE, 2004.
- [22] Leon Freris, David Infield, «Les énergies renouvelables pour la production d'électricité », Dunod, Paris, 2009.
- [23] A.Mericki, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de TOULOUSE, Avril 2005.
- [24] I. Merzouk, « Commande d'un convertisseur AC/DC en régime déséquilibré » mémoire de magister, Ecole militaire polytechnique, 2008.
- [25] M.Abbas, M.Michentec, «Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux appliquée à l'énergie éolienne », pfe ENP, 2006.
- [26] MICHEL PINARD, «Commande électronique des moteurs électriques ».
- [27] DESIRE LE GOURIERES, « Energie éolienne : Théorie, conception et calcul pratique des installations ».
- [28] M .Aïssani, « Commande numérique d'un convertisseur triphasé à quatre bras par MLI vectorielle à trois dimensions (application au filtrage actif) »Mémoire de magister, Ecole Militaire Polytechnique (EMP),Alger, 2009.
- [29] Mesbahi Tedjani, « Gestion des flux énergétiques dans un système de conversion éolienne »Mémoire de magister, Ecole Militaire Polytechnique , Alger , 2011.
- [30] Armand Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse doctorale, université Henry Poincaré, Nancy 1,2006.
- [31] D. Ould Abdeslam, « Technique neurométrique pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux basse tension », Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Haut Alsace, décembre 2005, France.
- [32] P. Ferracci, « La Qualité de l'énergie électrique », Cahier technique de Schneider Electric CT 199, édition février 2001.
- [33] P.Deflandre & P.Mouras, « Les harmoniques sur les réseaux électriques » Edition. Eyrolles, 1998.
- [34] K. Eftichios, K. Kostas, « design of a maximum power tracking system for wind energy - conversion applications » ,*IEEE transaction on industrial electronics*, vol. 53, no. 2, April 2006.
- [35] K. Tan & S. Islam, « Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors », *IEEE Transaction on energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 392-399, June 2004.
- [36] A. G. Abo-Khalil , D.C. Lee, « MPPT Control of wind generation Systems based on estimated wind speed using SVR », *IEEE Transaction on industrial electronics*, vol. 55, no. 3, Mars 2008.
- [37] Tarak Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apport des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone double alimentation », Thèse de doctorat, Ecole Militaire polytechnique d'Alger, Ecole Centrale de LILLE, 2011.
- [38] E. Bettega & J.N.Fiorina « Harmoniques : convertisseurs propres et compoisseurs actifs », Cahier technique de Schneider Electric CT 183.

- [39] C .Collonobet & J.M.Lupin & J.Shcnoek, « Perturbation harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement 1 », Cahier technique de Schneider Electric CT 152, édition février 2001.
- [40] C. Preve, « Les réseaux électriques industriels 2 », collection Lavoisier, 2005.
- [41] R. Calva, « Les perturbations électriques en BT », Cahier technique de Schneider Electric CT 141.
- [42] D. Fulchiron, « Surtension et coordination de l'isolement », Cahier technique de Schneider Electric CT 151, édition décembre 1992.
- [43] R. Wierda, « flicker ou scintillement des sources lumineuses », Cahier technique de Schneider Electric CT 151, édition décembre 1992.
- [44] CEI 61000-4-15, Compatibilité électromagnétique, partie 4 « Flicker mètre spécification fonctionnement et conception », Septembre 1998.
- [45] M.Allali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux électriques Basse tension », Thèse de Doctorat, Université de Luis Pasteur-Strasbourg, 2002.
- [46] M. Allouane & Y. Maloum « Etude d'un changeur de fréquence indirect application a la conduite d'une machine synchrone a aimants permanents », Thèse d'Ingénieur d'Etat, USTHB, 2004.

Annexes

Annexe I

a) Données de la machine asynchrone à double alimentation utilisée :

- Puissance nominale : $P_N = 4 \text{ kW}$
- Tension et fréquence d'alimentation : $220\text{V}/380\text{V}-50 \text{ Hz}$
- Courant : $15/8.6 \text{ A}$
- Vitesse de rotation : $\Omega_N = 1440\text{tr}/\text{mn}$

b) Paramètres de la machine :

- Nombre de paires de pôles : $P = 2$
- Résistance d'une phase statorique : $R_s = 1.2\Omega$
- Résistance d'une phase rotorique : $R_r = 1.8\Omega$
- Inductance d'une phase statorique : $L_s = 0.1554\text{H}$
- Inductance d'une phase rotorique : $L_r = 0.1568\text{H}$
- Inductance mutuelle : $M = 0.15\text{H}$

c) Constantes mécaniques :

- Moment d'inertie du rotor : $J = 0.2\text{kg} \cdot \text{m}^2$
- Coefficient de frottement : $f_r = 0.001\text{N} \cdot \text{ms}/\text{rad}$

d) Paramètres de la turbine éolienne simulée :

- Puissance 6kW
- Nombre de pales =3
- Longueur d'une pale : $R = 3\text{m}$
- Gain du multiplicateur : $G = 5$
- Coefficient de viscosité : $f = 0.18\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Annexe II

Éléments de la notation matricielle

$$[V_s] = \begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{pmatrix} : \text{Tensions simples du stator.}$$

$$[V_r] = \begin{pmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{pmatrix} : \text{Tensions simples du rotor.}$$

$$[R_s] = R_s \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} : \text{Matrice des résistances statoriques par phase}$$

$$[R_r] = R_r \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} : \text{Matrice des résistances rotoriques par phase.}$$

$$[i_r] = \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} : \text{Vecteur des courants simples rotoriques}$$

$$[i_s] = \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} : \text{Vecteur des courants simples statoriques.}$$

$$[\Phi_s] = \begin{pmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{pmatrix} : \text{Vecteur des flux embrassés par chaque phase du stator.}$$

$$[\Phi_r] = \begin{pmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{pmatrix} : \text{Vecteur des flux embrassés par chaque phase du rotor.}$$

$$[L_{ss}] = \begin{pmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{pmatrix} : \text{Matrice des inductances propres du stator.}$$

$$[L_{rr}] = \begin{pmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{pmatrix} : \text{Matrice des inductances propres du rotor.}$$

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

$[M_{sr}]$: Matrice de couplage stator- rotor.

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$ Matrice de couplage rotor-stator.

Pour obtenir le système d'équations d'état, nous allons procéder aux calculs suivants :

On a :

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} \quad (\text{AII.1})$$

Or :

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \Rightarrow i_{ds} = \frac{1}{L_s} [\varphi_{ds} - M \cdot i_{dr}]$$

Dés lors, l'équation (AII.1) s'écrira :

$$V_{ds} = R_s \left[\frac{1}{L_s} (\varphi_{ds} - M \cdot i_{dr}) \right] + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \cdot \varphi_{qs}$$

D'où :

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = V_{ds} - \left(\frac{R_s}{L_s}\right) \cdot \varphi_{ds} + \left(\frac{R_s}{L_s}\right) \cdot M \cdot i_{dr} + \omega_s \cdot \varphi_{qs}$$

En posant : $\left(\alpha_s = \frac{R_s}{L_s}\right)$, l'équation précédente prend la forme finale :

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \varphi_{ds} + \omega_s \cdot \varphi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds} \quad (\text{AII.2})$$

De même, pour obtenir la deuxième équation on part de l'équation :

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} \quad (\text{AII.3})$$

Mais :

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \Rightarrow i_{qs} = \frac{1}{L_s} [\varphi_{qs} - M \cdot i_{qr}]$$

Portons cette valeur en (A.II.3), on obtient :

$$\begin{cases} V_{qs} = R_s \left[\frac{1}{L_s} (\varphi_{qs} - M \cdot i_{qr}) \right] + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = V_{qs} - \left(\frac{R_s}{L_s}\right) \cdot \varphi_{qs} + \left(\frac{R_s}{L_s}\right) \cdot M \cdot i_{qr} - \omega_s \cdot \varphi_{ds} \end{cases}$$

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \varphi_{qs} - \omega_s \cdot \varphi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs} \quad (\text{AII.4})$$

- $\frac{di_{dr}}{dt} ?$

On part de :

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr}$$

D'autre part :

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \quad (\text{AII.5})$$

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (\text{AII.6})$$

De (A.II.6), on obtient :

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s} [\varphi_{ds} - M \cdot i_{dr}]$$

Portons cette valeur dans (A.II.5), on obtient :

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} [\varphi_{ds} - M \cdot i_{dr}]$$

C'est-à-dire :

$$\varphi_{dr} = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right) \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds}$$

En dérivant les deux membres de l'égalité précédente par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{d\varphi_{dr}}{dt} = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{M}{L_s} \cdot \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \quad (\text{AII.7})$$

Mais :

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \varphi_{ds} + \omega_s \cdot \varphi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds}$$

D'où (A.II.7) donne :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{M}{L_s} \cdot [-\alpha_s \cdot \varphi_{ds} + \omega_s \cdot \varphi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds}] \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + L_r \cdot \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{M}{L_s} \cdot [-\alpha_s \cdot \varphi_{ds} + \omega_s \cdot \varphi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds}] - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr} \\ L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} = V_{dr} - R_r \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds} - \frac{M}{L_s} \cdot \omega_s \cdot \varphi_{qs} - \frac{M^2}{L_s} \cdot \alpha_s \cdot i_{dr} - \frac{M}{L_s} \cdot V_{ds} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr} \end{cases}$$

On pose :

$$\sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right)$$

$$\sigma_r \cdot \frac{di_{dr}}{dt} = V_{dr} - \left(R_s + \alpha_s \cdot \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds} - \frac{M}{L_s} \cdot \omega_s \cdot \varphi_{qs} - \frac{M}{L_s} \cdot V_{ds} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr}$$

$$\text{Où : } \frac{di_{dr}}{dt} = - \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{\sigma_r L_s^2} \right) \cdot i_{dr} + \frac{\alpha_s}{\sigma_r} \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds} - \frac{M}{\sigma_r L_s} \cdot \omega_s \cdot \varphi_{qs} - \frac{M}{\sigma_r L_s} \cdot V_{ds} + \frac{\omega_s}{\sigma_r} \cdot \varphi_{qr} - \frac{\omega}{\sigma_r} \cdot \varphi_{qr} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot V_{ds}$$

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \quad \text{et} \quad \varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \Rightarrow i_{qs} = \frac{1}{L_s} [\varphi_{qs} - M \cdot i_{qr}]$$

D'où :

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + \frac{M}{L_s} [\varphi_{qs} - M \cdot i_{qr}]$$

C'est-à-dire :

$$\varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} + \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{qs}$$

En remplaçant l'expression de φ_{qr} dans l'équation donnant V_{dr} on obtient :

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + L_r \cdot \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{M}{L_s} \cdot \left[-\alpha_s \cdot \varphi_{ds} + \omega_s \cdot \varphi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds} \right] - (\omega_s - \omega) \cdot \left[\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} + \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{qs} \right]$$

Après simplification on obtient finalement l'expression de $\frac{di_{dr}}{dt}$ s'écrit :

$$\frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \varphi_{ds} - \beta \cdot \omega \cdot \varphi_{qs} - \beta \cdot V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot V_{dr}$$

Avec

$$\gamma_r = - \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{\sigma_r L_s^2} \right)$$

$$\beta = \frac{M}{\sigma_r L_s}$$

- $\frac{di_{qr}}{dt} = ?$

Partons de l'équation :

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{dr}$$

Par ailleurs,

$$\varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} + \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{qs} \quad \text{et}$$

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \Rightarrow i_{qs} = \frac{1}{L_s} [\varphi_{qs} - M \cdot i_{qr}]$$

Portons la valeur de i_{qs} dans l'expression de φ_{qr} , on obtient :

$$\varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} + \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{qs}$$

En dérivant cette égalité/t, on obtient : $\frac{d\varphi_{qr}}{dt} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + \frac{M}{L_s} \cdot \frac{d\varphi_{qs}}{dt}$ Mais : $\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \varphi_{qs} - w_s \cdot \varphi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs}$ Donc :

$$\frac{d\varphi_{qr}}{dt} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + \frac{M}{L_s} (-\alpha_s \cdot \varphi_{qs} - w_s \cdot \varphi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs})$$

Exprimons maintenant φ_{dr} :

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds}$$

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s} [\varphi_{ds} - M \cdot i_{dr}]$$

$$\varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds}$$

Dés lors, l'équation donnant V_{qr} , s'écrira :

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + L_r \cdot \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + \frac{M}{L_s} \cdot [-\alpha_s \cdot \varphi_{qs} + w_s \cdot \varphi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs}] - (w_s - w) \cdot \left[\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{ds} \right]$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{qr} + (w_s - w) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \varphi_{qs} - \beta \cdot p \omega \cdot \varphi_{ds} - \beta \cdot V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot V_{qr}$$

Après simplification, on obtient :

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

On rappelle que :

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