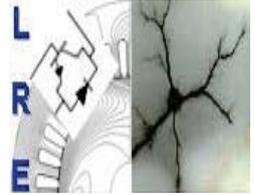




Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :
TOUATI Abdelghani

Intitulé

Etude et commande d'un système éolien avec amélioration de la qualité du réseau électrique

Directeurs du mémoire :

MAHMOUDI M.O
BERKOUK E.M

Professeur
Professeur

ENP
ENP

ENP 2012

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 نقتراح تطبيق التقنيات التالية
تقنية الحقل الموجه. تقنية تعديل سعة النبضة للموّد. تقنية التحكم بواسطة التيار
من ايجابيات نضام التحكم هذا منح الشبكة الكهربائية خدمات أخرى كتصفيتها 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

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.

Introduction générale

L'énergie éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes, mais pour pallier 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 entrainements exigent pour ces machines de hautes performances, une fiabilité accrue et un coût réduit.

I : Modélisation et simulation de la turbine éolienne

Dans notre simulation d'une éolienne de 6 kW, nous avons choisi un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3m et le rapport du multiplicateur de vitesse est de 5. On remarque ci-dessous que la vitesse du rotor de la machine suit les variations du vent comme l'indiquent les flèches.

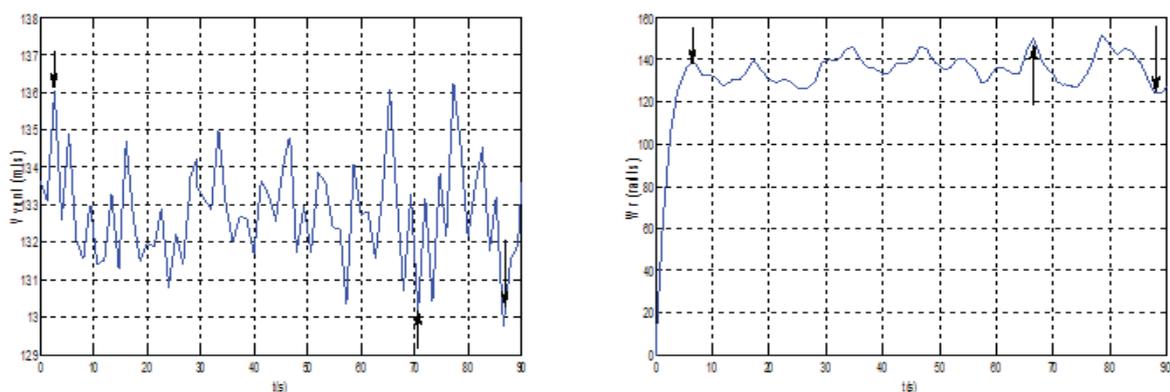
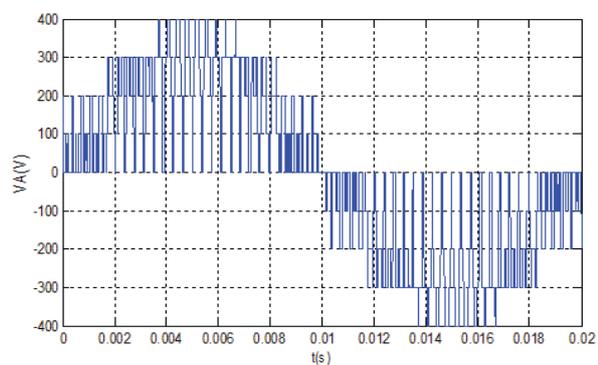
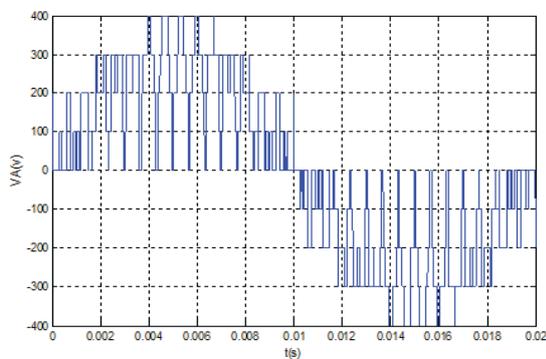


Figure 1: Résultat de simulation de la turbine éolienne

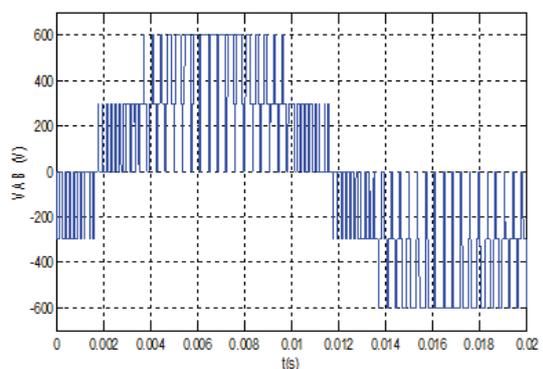
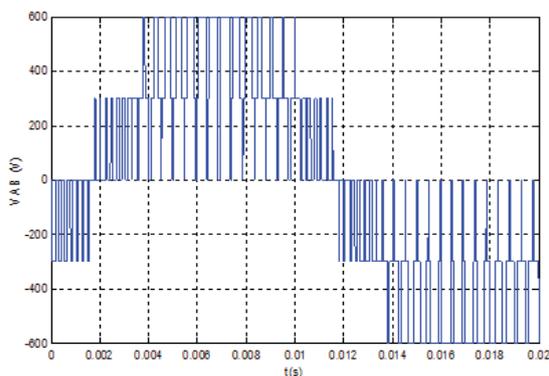
II : Onduleur triphasé à trois niveaux

Nous avons utilisé dans ce travail un onduleur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C qui est un onduleur multiniveaux qui permet d'avoir à sa sortie des formes de tensions proches de

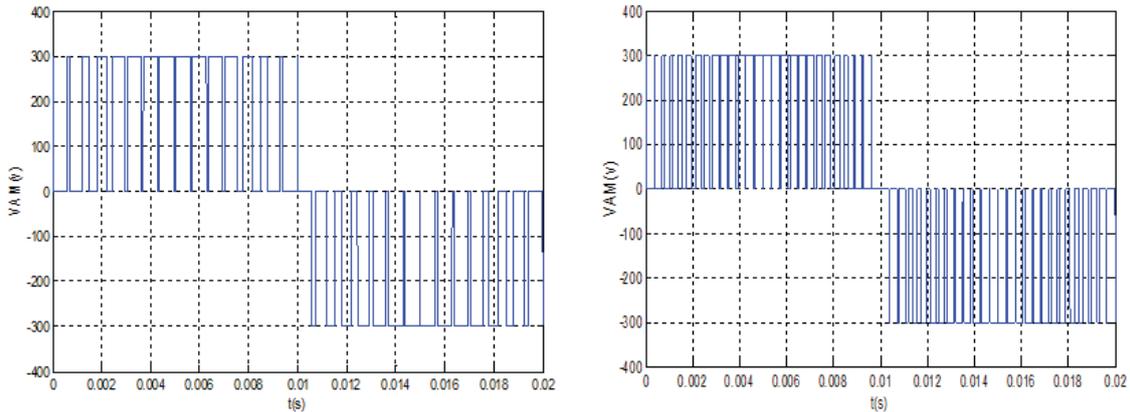
la sinusoïde ainsi que la diminution des harmoniques qui peuvent être générées par ces types de convertisseurs. La diminution de ces harmoniques est de plus en plus bonne si les convertisseurs sont commandés par des techniques assurant le contrôle des interrupteurs du convertisseur à l'ouverture et à la fermeture. Face à cela, nous avons commandé notre onduleur par la technique M.L.I triangulo-sinusoidale à deux porteuses qui est caractérisé par les deux paramètres : l'indice de modulation m qui est le rapport entre la fréquence de la porteuse f_p et la fréquence de la référence f ie $m = \frac{f_p}{f}$, le deuxième paramètre est le taux de modulation r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence sur la valeur crête de la porteuse ie $r = \frac{V_m}{U_{pm}}$. Les résultats de simulation sont donnés ci-dessous :



a) La tension simple



b) La tension composée



c) La tension V_{AM}

Figures 2 : Tensions de sortie de l'onduleur N.P.C triphasé à trois niveaux pour $m=15$ à gauche et pour $m=27$ à droite

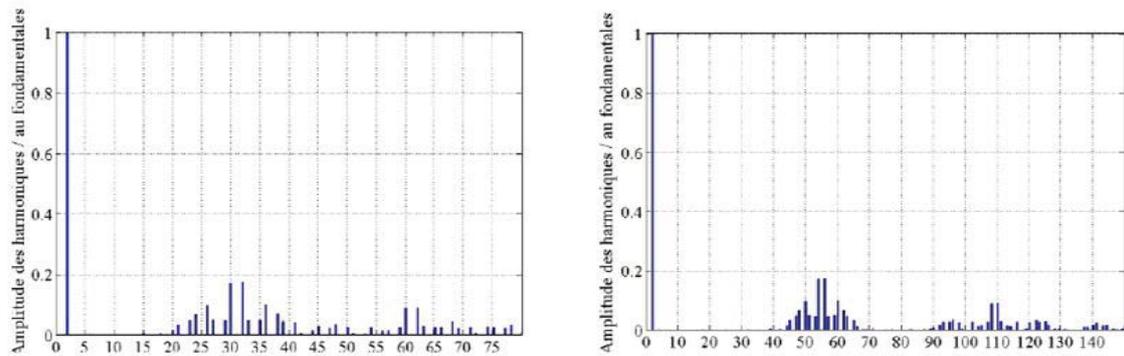


Figure 3 : Rang d'harmonique pour $m=15$ à gauche et pour $m=27$ à droite

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 leur filtrage par l'inductance de la machine.

III : Commande vectorielle en puissance active et réactive de la MADA

L'objectif principal de ce type de commande est d'aboutir à un modèle de la machine qui permet de commander indépendamment des puissances active et réactive.

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

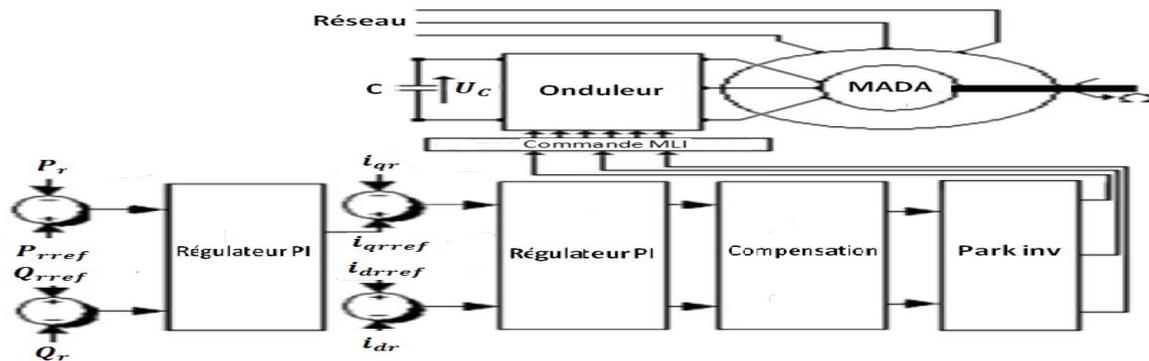


Figure 4 : Principe général de la commande vectorielle en puissances active et réactive rotorique de la MADA

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 :

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

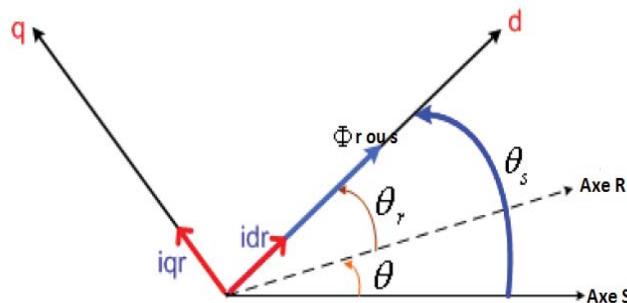


Figure 5 : Orientation de flux

L'expression du couple électromagnétique devient alors comme suite :

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

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 :

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

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

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

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

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

Avec :

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R_s L_r + R_r L_s}{M} \\ \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \\ \beta = \frac{R_s}{M} \end{cases} \quad (7)$$

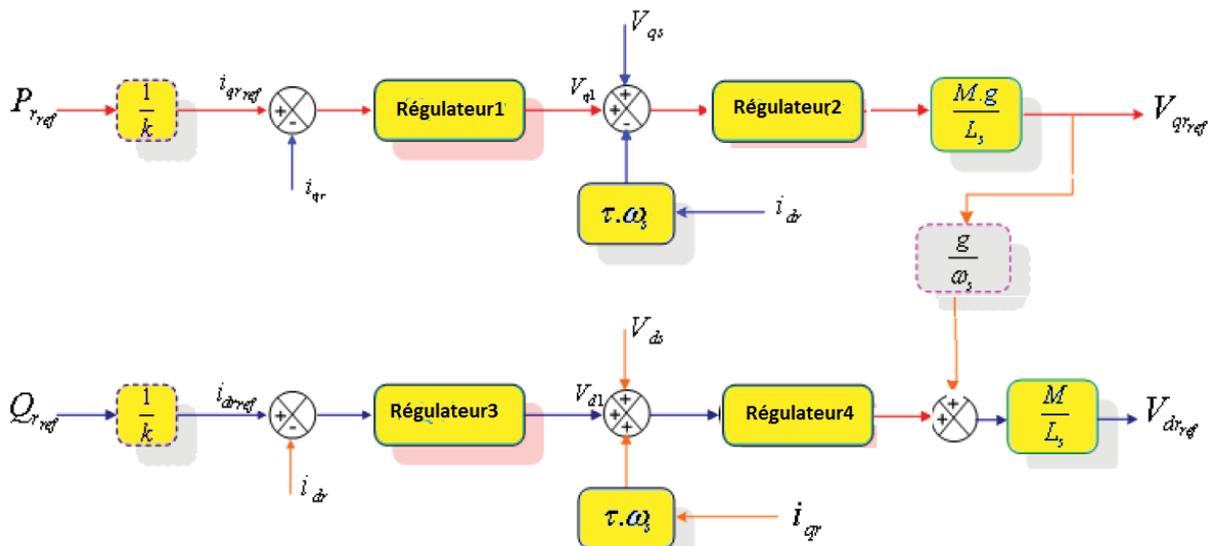
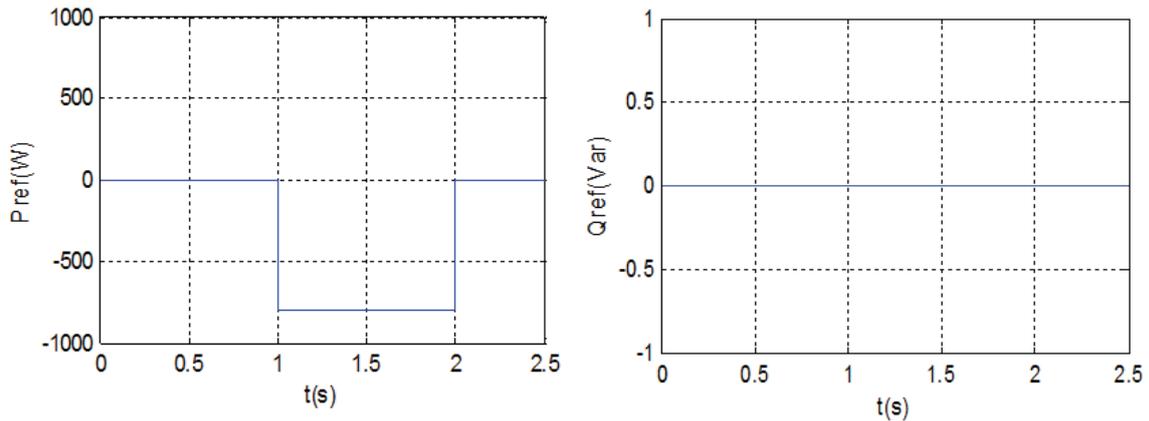


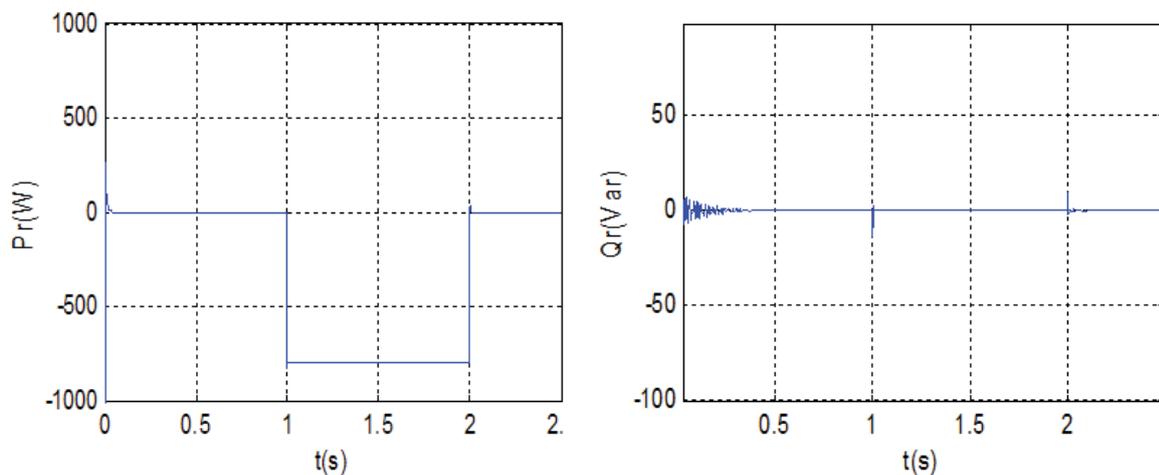
Figure 6 : schéma bloc de la structure de commande de la MADA alimentée en tension

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.

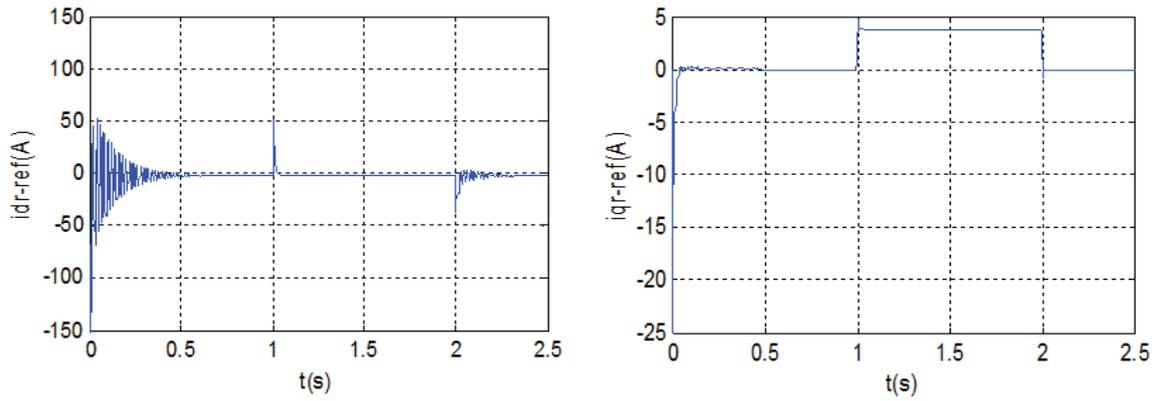
- Le générateur est entraîné à une vitesse constante.
- $Q_{rref} = 0$ Pendant tout l'essai.
- On applique un échelon négatif : $P_{rref} = -800W$ dans l'intervalle [1,2] s.



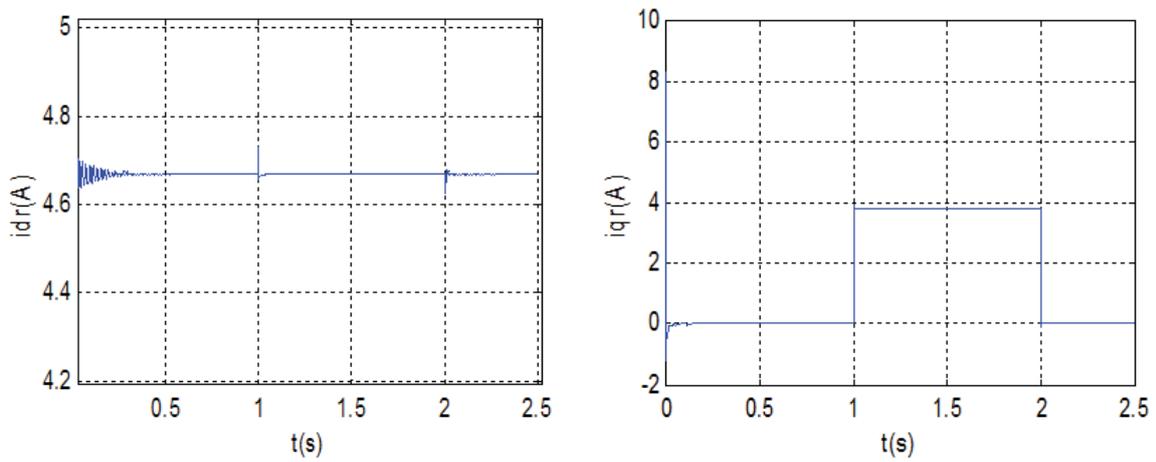
a) Les puissances rotorique de référence



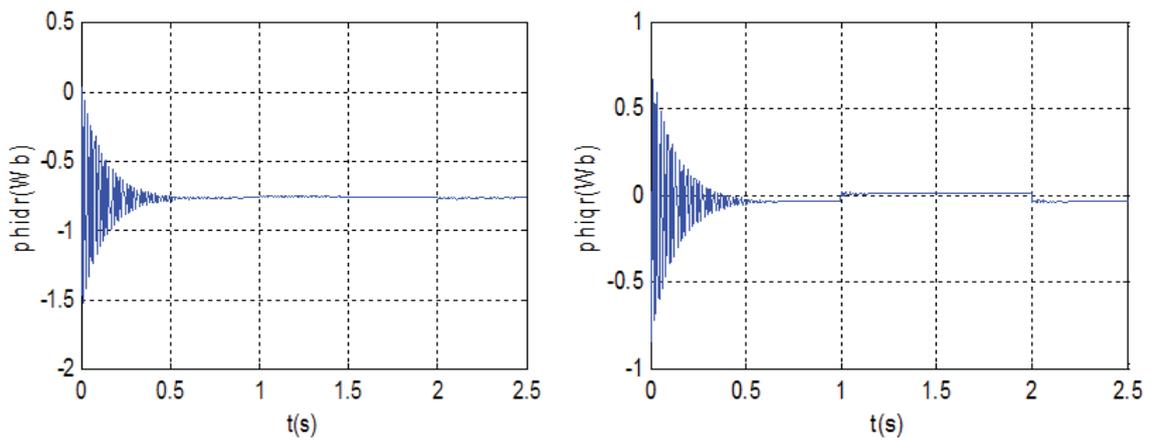
b) Les puissances rotorique



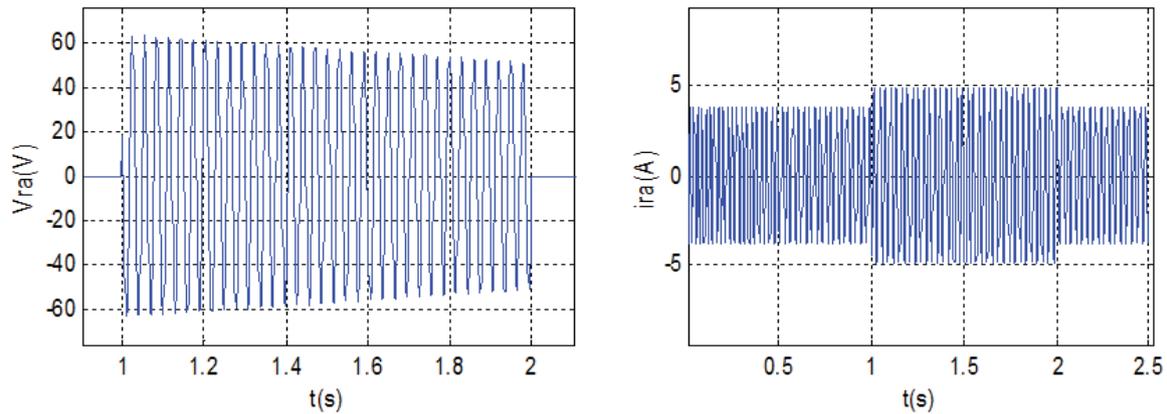
c) Les courants de référence



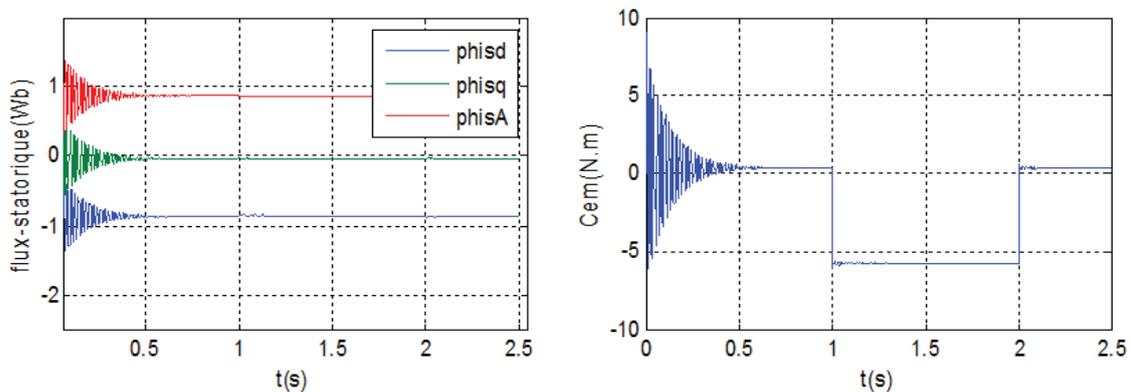
d) Les courants rotoriques



e) Les flux rotoriques



f) Tension et courant d'une phase rotorique



g) Flux statorique et couple électromagnétique

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

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.

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

IV.1 Redresseur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C

Nous avons utilisé le redresseur à trois niveaux qui est un élément de la cascade et qui est de la même conception que l'onduleur triphasé à trois niveaux vu précédemment, à une condition d'adopter les conventions de signes.

La stratégie de commande en courant est appliquée pour notre redresseur.

IV.1.1 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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = 1 \text{ et } B_{k2} = 0 \\ B_{k1} = 0 \text{ et } B_{k2} = 0 \\ B_{k1} = 1 \text{ et } B_{k2} = 1 \end{array} \right. \quad (8)$$

Avec :

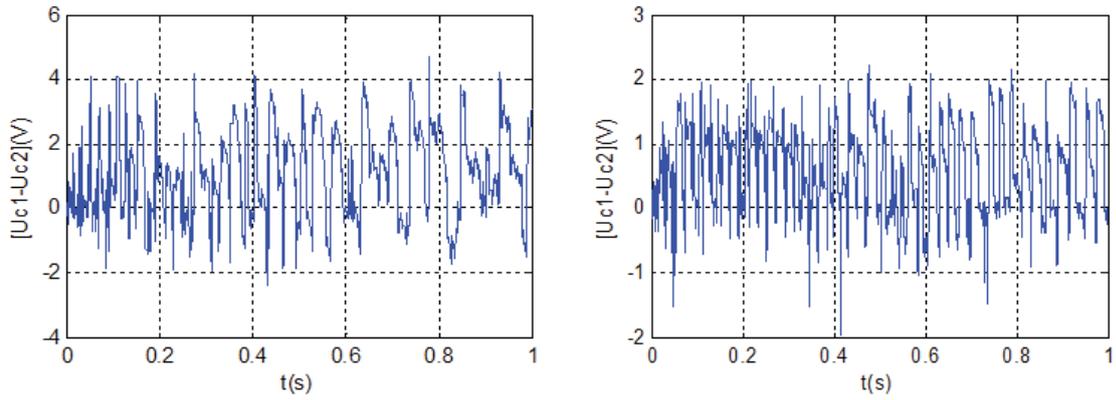
ε_k : L'écart entre le courant de référence i_{refk} et le courant réel i_{resk} tel que :

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

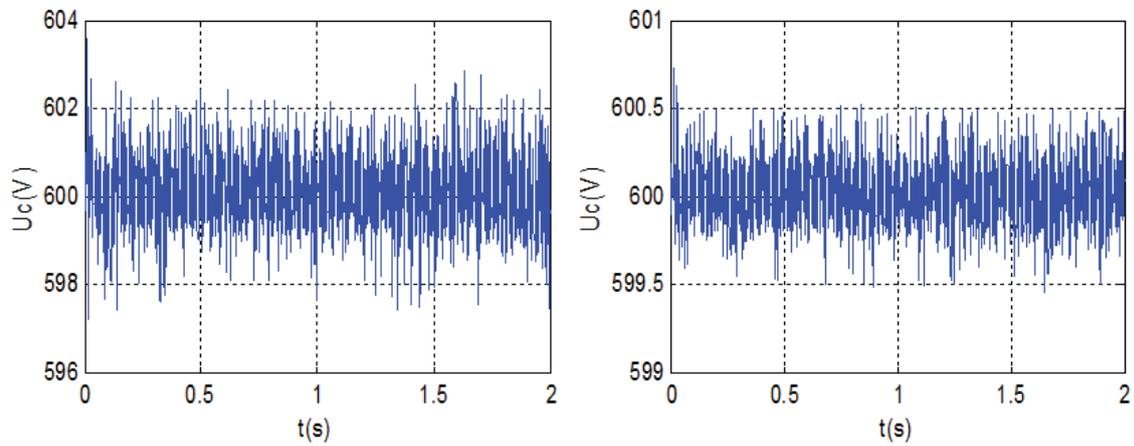
Δi : La largeur de la bande d'hystérésis.

Simulation et interprétation

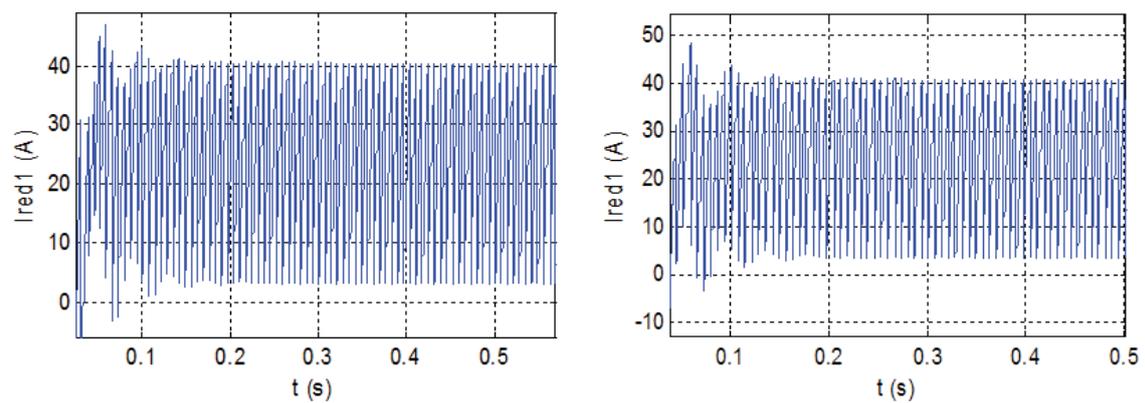
Les Figures (8) représentent les résultats de simulation d'un redresseur triphasé à trois niveaux commandé par la stratégie d'hystérésis en courant ($\Delta i = 0.001$) lorsqu'il alimente une charge résistive .Ces simulations sont faites pour deux valeurs de capacité ($C_1 = C_2 = 10mF$) et ($C_1 = C_2 = 20mF$) avec $R_{ch} = 25\Omega$.



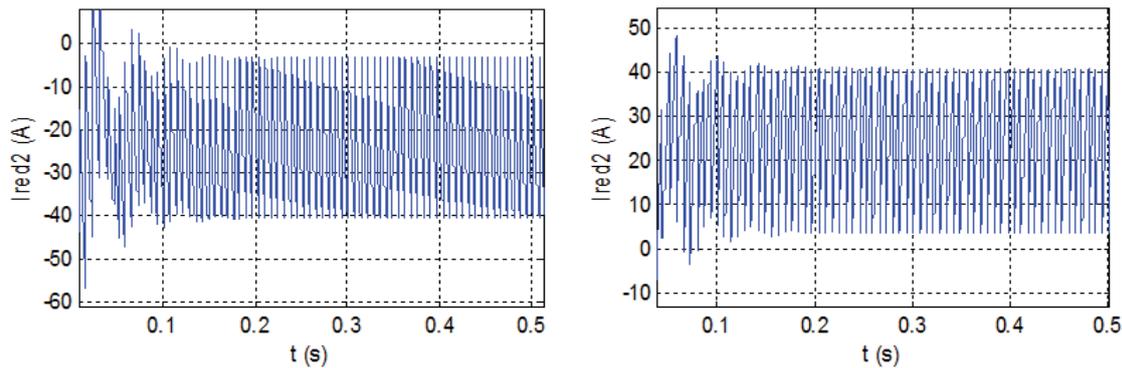
a) La différence des tensions U_{C1} et U_{C1}



b) La tension du bus continu



c) Le courant redressé i_{red1}



d) Le courant redressé i_{red2}

Figures 8 : 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 [5].

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-sinusoidale 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 9)

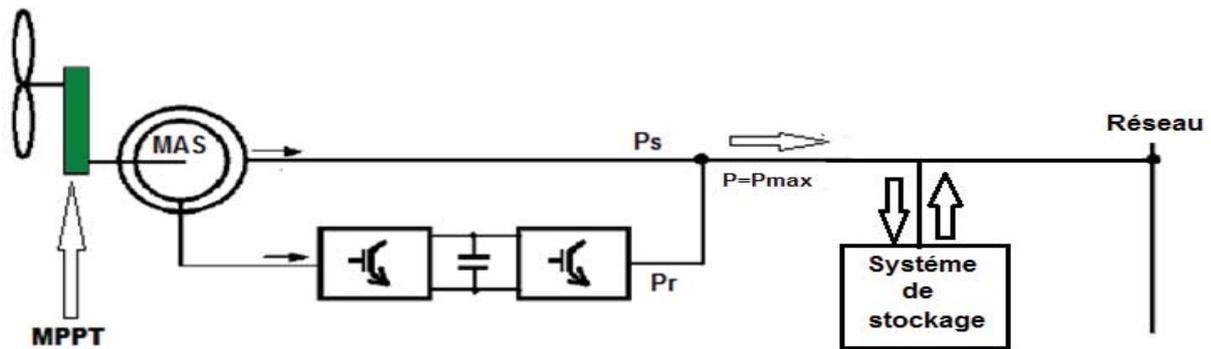


Figure 9 : Cascade d'un Redresseur de courant triphasé à trois niveaux-Onduleur de tension triphasé-MADA-Turbine.

IV.2.2 Modélisation du filtre intermédiaire de la cascade

La (figure 10) représente la structure générale du filtre intermédiaire de la cascade. Son modèle est défini par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = i_{d1red} - i_{d1ond} \rightarrow R_1 \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = i_{d2red} - i_{d2ond} \rightarrow R_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_{c1} = \frac{1}{C_1} \int (i_{d1red} - i_{d1ond}) dt \\ U_{c2} = \frac{1}{C_2} \int (i_{d2red} - i_{d2ond}) dt \end{cases} \quad (9)$$

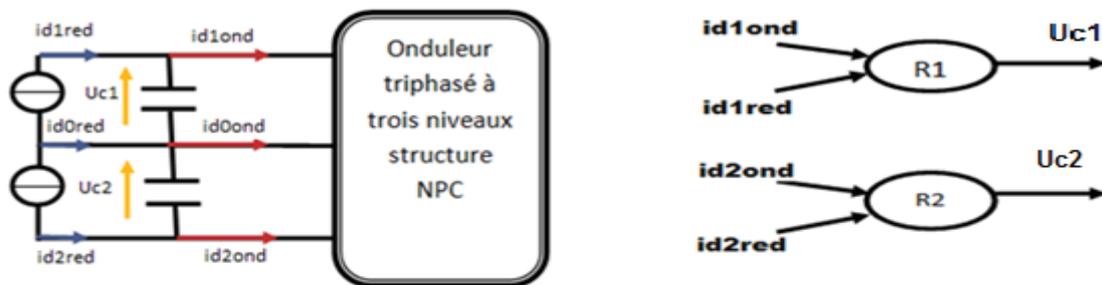
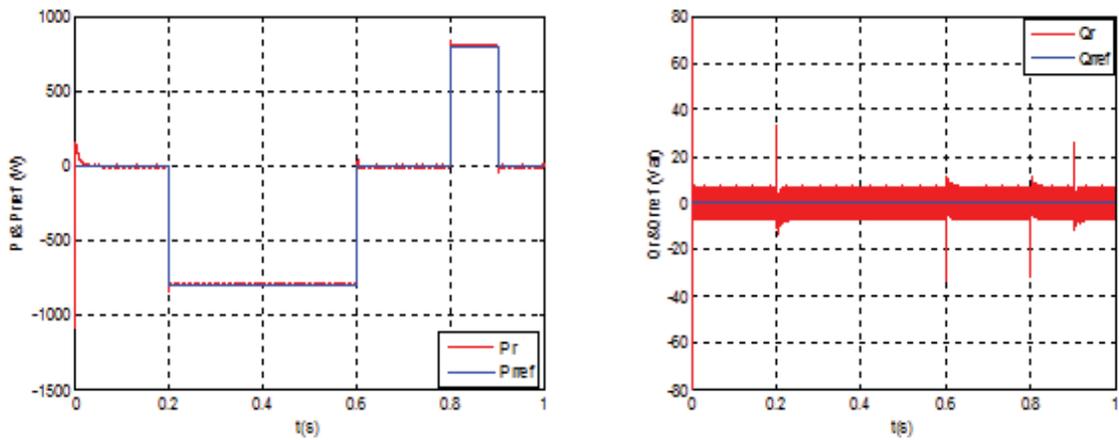
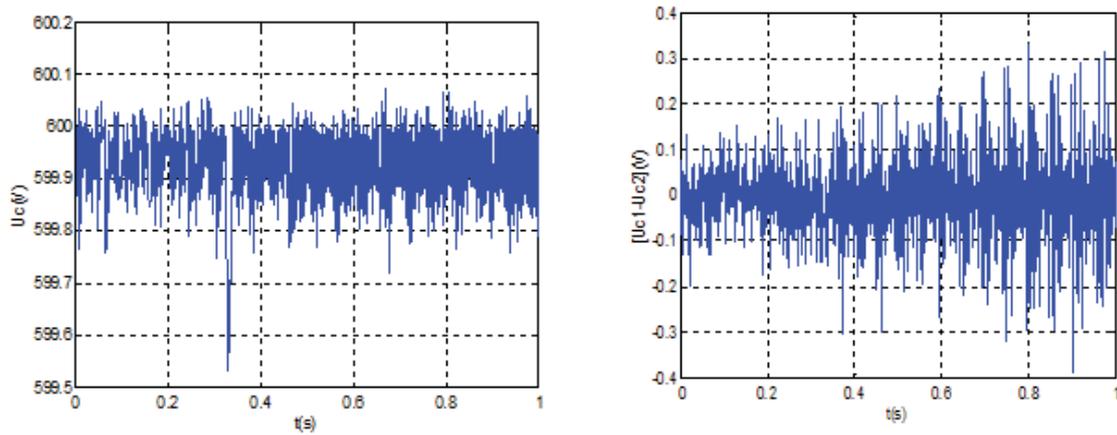


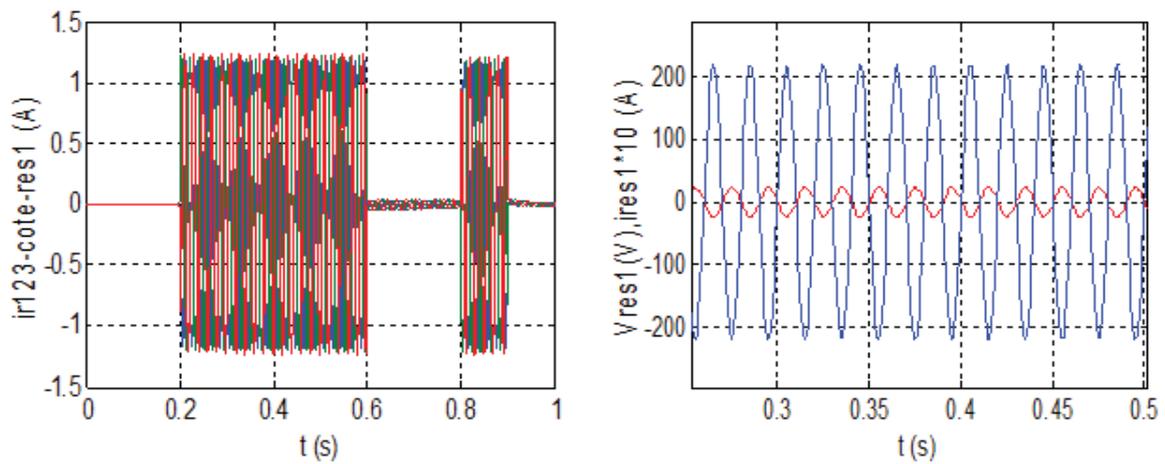
Figure 10 : Filtre intermédiaire de la cascade redresseur de courant triphasé à trois niveaux-onduleur triphasé à trois niveaux et son graphe informationnel.



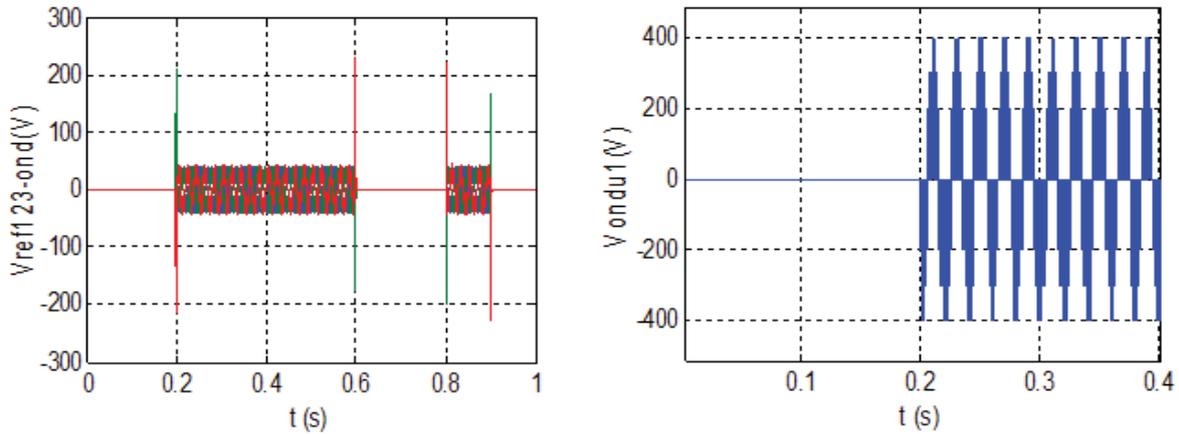
a) Puissances de références et puissances réelles



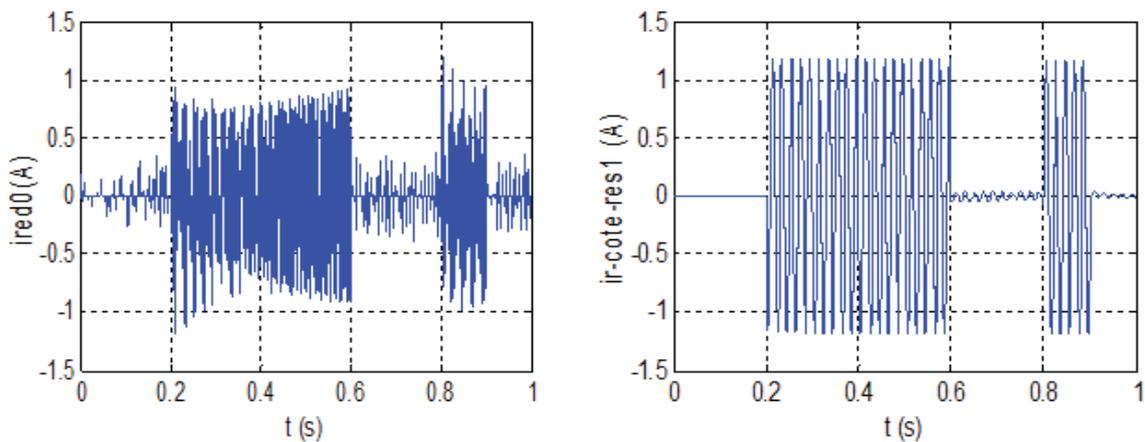
b) Tension du bus continu et différence des tensions



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



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

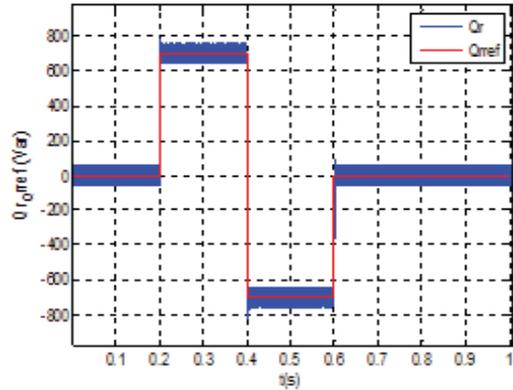
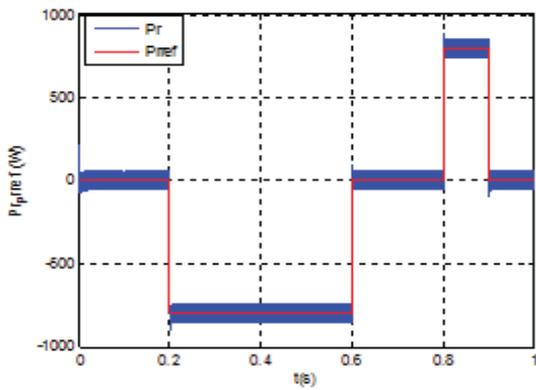


e) Courant redressé i_{red0} , courant rotorique côté réseau d'une phase

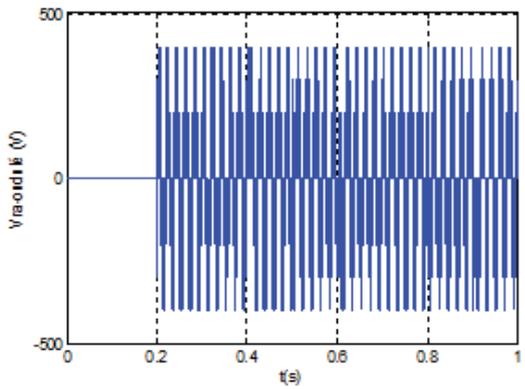
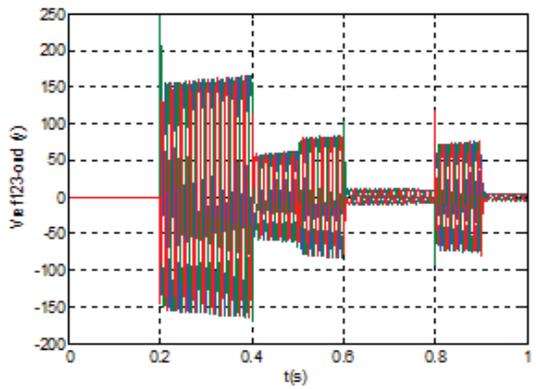
Figure 11.a : Résultats de simulation de la cascade complète (a,b,c,d,e) avec $Q_{rref} = 0$

Interprétation

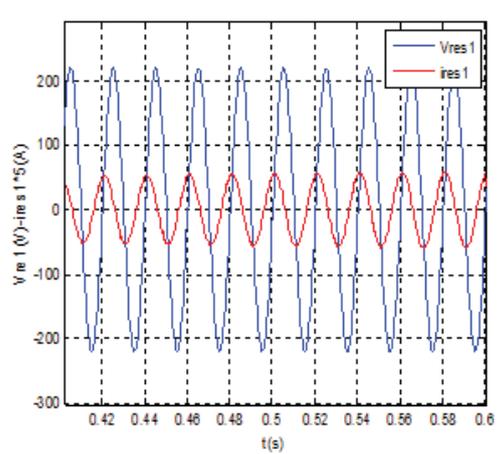
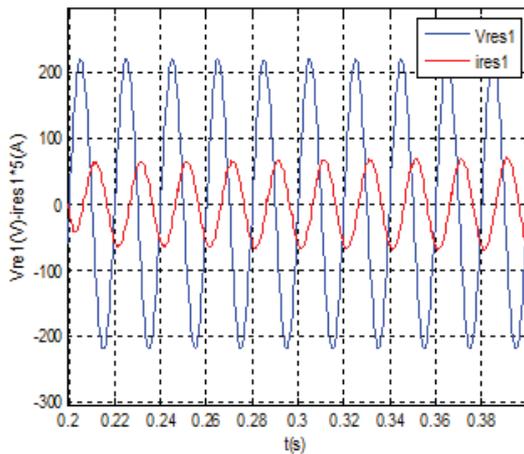
- Pour les caractéristiques de la MADA, on remarque bien que la puissance active et la puissance réactive rotorique suivent parfaitement leurs références,
- Le courant d'une phase rotorique côté réseau présente une sinusoïde de fréquence identique à celle du réseau, ce qui explique que le problème d'adaptation 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



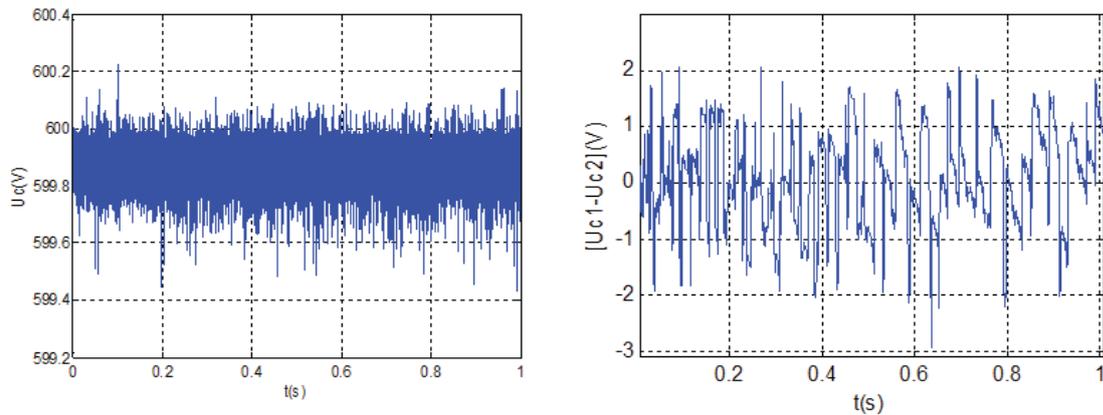
a) Puissances de références et puissances réelles



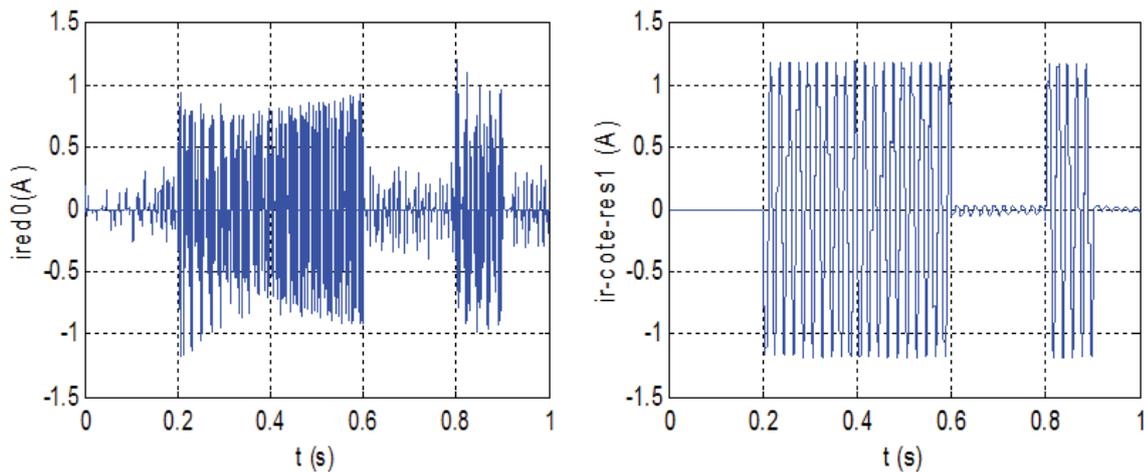
b) Tensions de référence et tension ondulée d'une phase



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

V : Filtrage actif par l'éolienne

V.1 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 [6],[7],[8].

La figure (12) montre la structure permettant de filtrer les harmoniques de courant générés par des charges polluantes connectées au réseau.

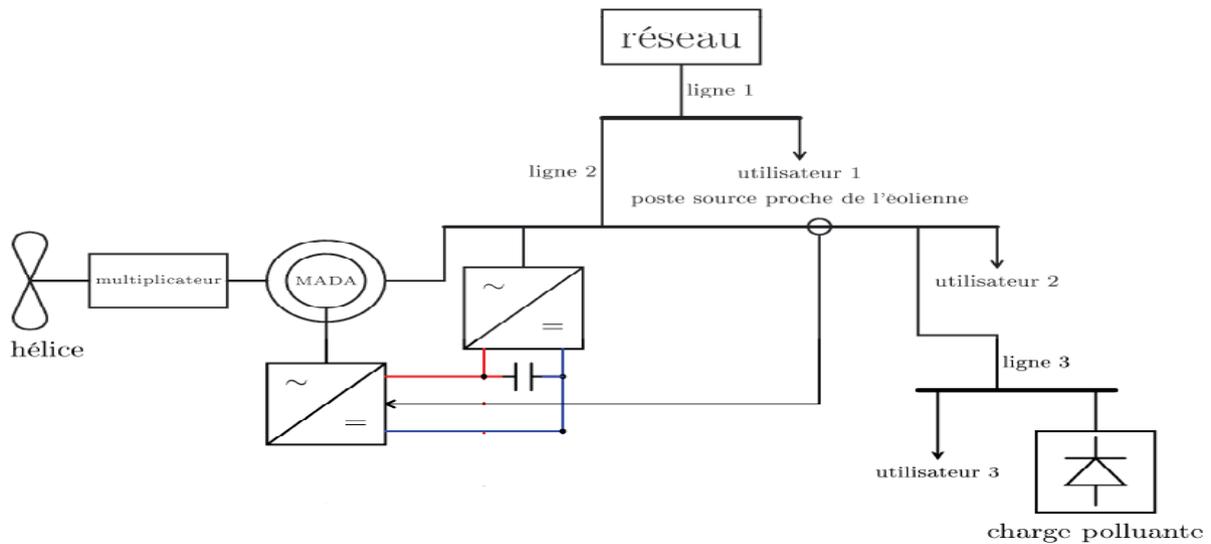


Figure 12 : Schéma du système éolien avec filtrage par la MADA

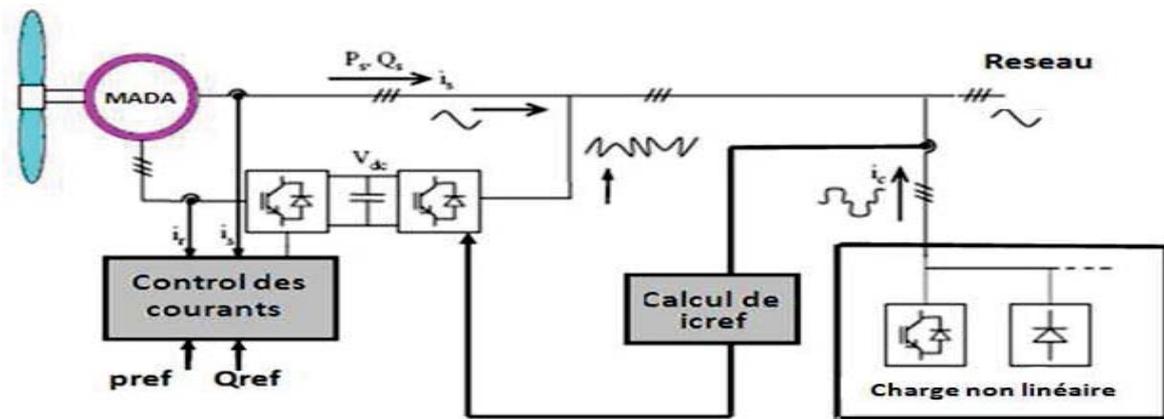


Figure 13 : Schéma de principe du filtrage actif avec la MADA

V.2 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 [1].

V.3 Méthode des puissances réelle et imaginaire en utilisant la transformation de Park

V.4 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 :

$$\begin{pmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{pmatrix} \quad (11)$$

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

$$\begin{pmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{pmatrix} \quad (13)$$

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

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{sd} & v_{sq} \\ v_{sq} & -v_{sd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\text{D'où} \quad \begin{pmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{pmatrix} = \frac{1}{v_{sd}^2 + v_{sq}^2} \begin{pmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} \quad (15)$$

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

$$\begin{cases} p = p_c + p_h \\ q = q_c + q_h \end{cases} \quad (16)$$

En remplaçant le système (16) dans le système (15), on obtient le système suivant :

$$\begin{pmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \underbrace{\begin{pmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_c \\ 0 \end{pmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \frac{1}{\Delta} \underbrace{\begin{pmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ q_c \end{pmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \frac{1}{\Delta} \underbrace{\begin{pmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_h \\ q_h \end{pmatrix}}_{\text{Courant harmonique produit par les charges non linéaires et le déséquilibre}} \quad (17)$$

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

Le tableau (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(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 :

$$\begin{pmatrix} i_{cdn} \\ i_{cqn} \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_h \\ q_h \end{pmatrix} \quad (18)$$

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.

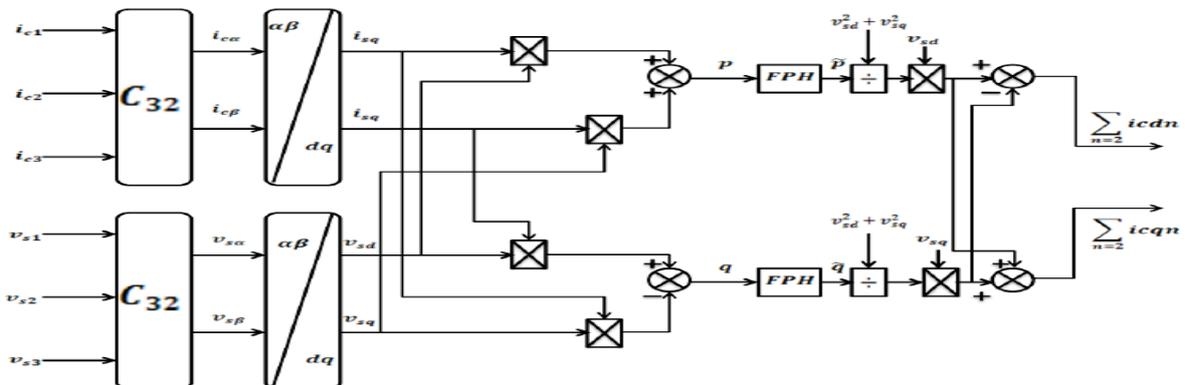


Figure 14 : Méthode des puissances réelle et imaginaire en utilisant la transformation de Park.

V.5 Commande en courant du convertisseur côté réseau dans le repère d-q

La structure de commande (15) 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 [7].

La structure de commande est donnée par la figure(15) :

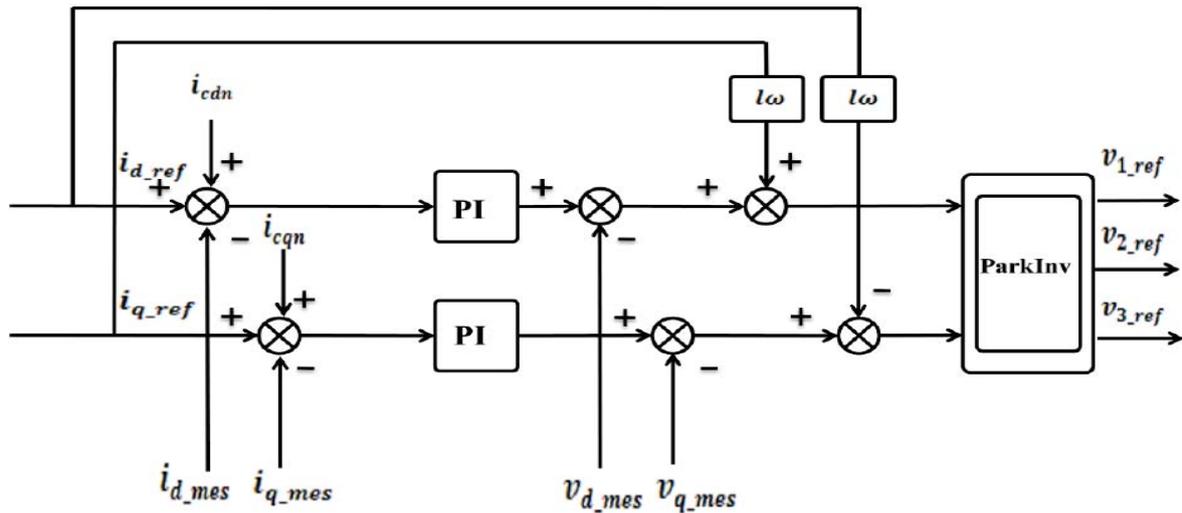


Figure 15 : La boucle de régulation des courants avec les références harmoniques.

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

$$\begin{cases} i_{dtotal} = i_d + i_{cdnr} \\ i_{qtotal} = i_q + i_{cqnr} \end{cases} \quad (19)$$

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 $[0.3 ; 0.7]s$.

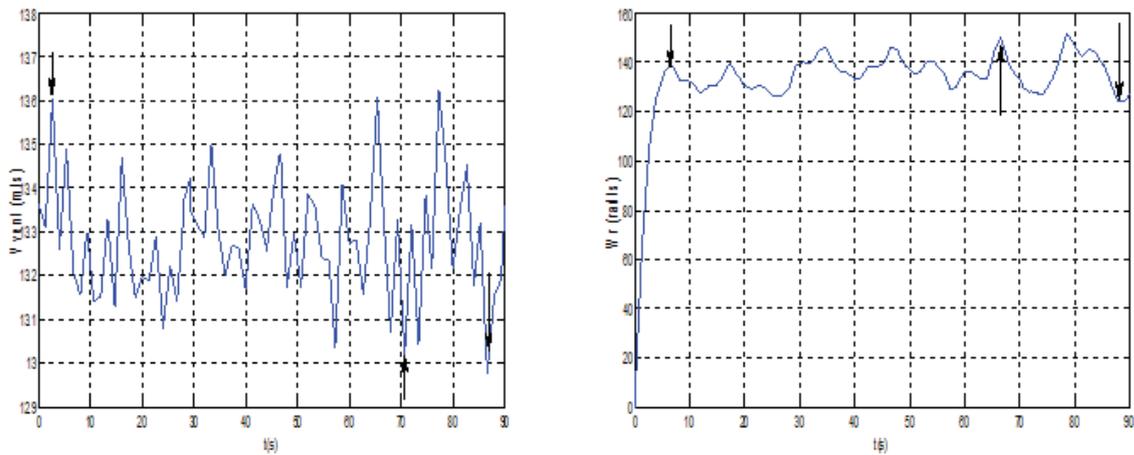
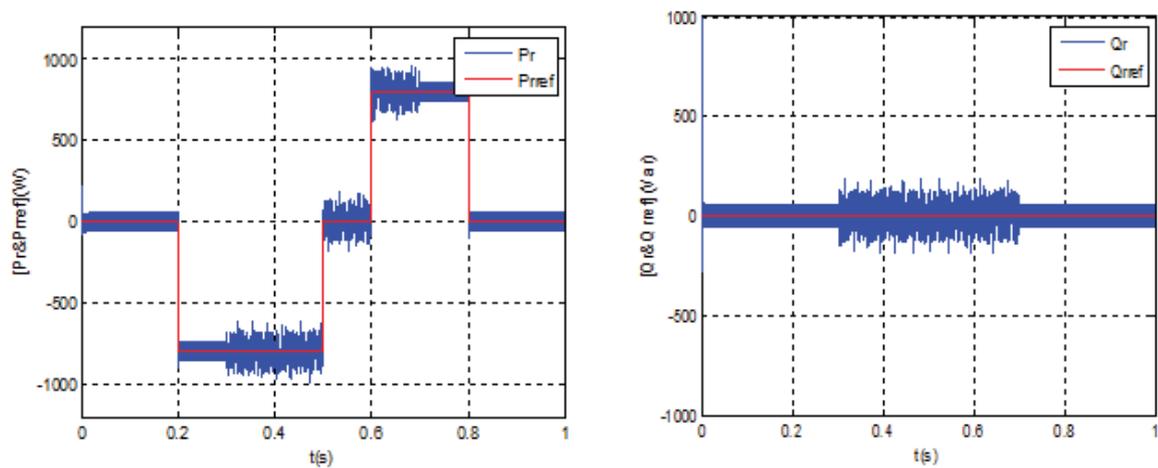
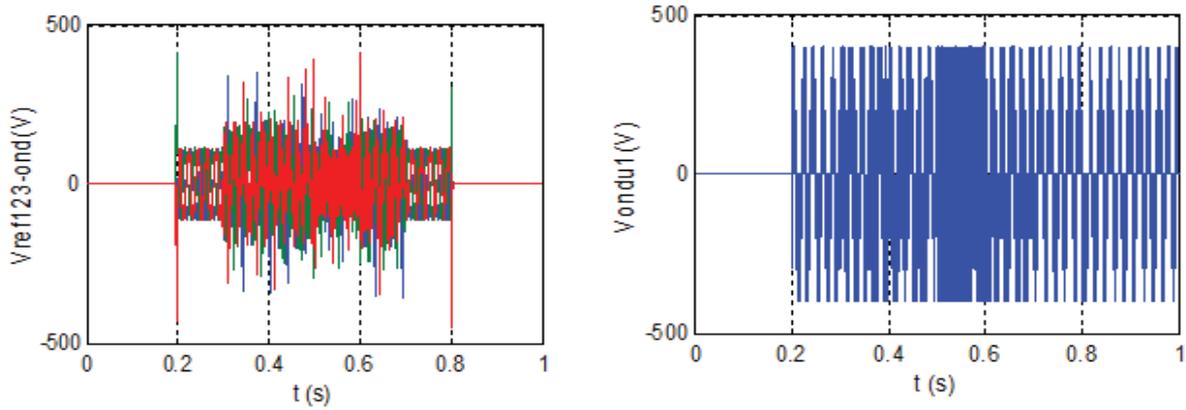


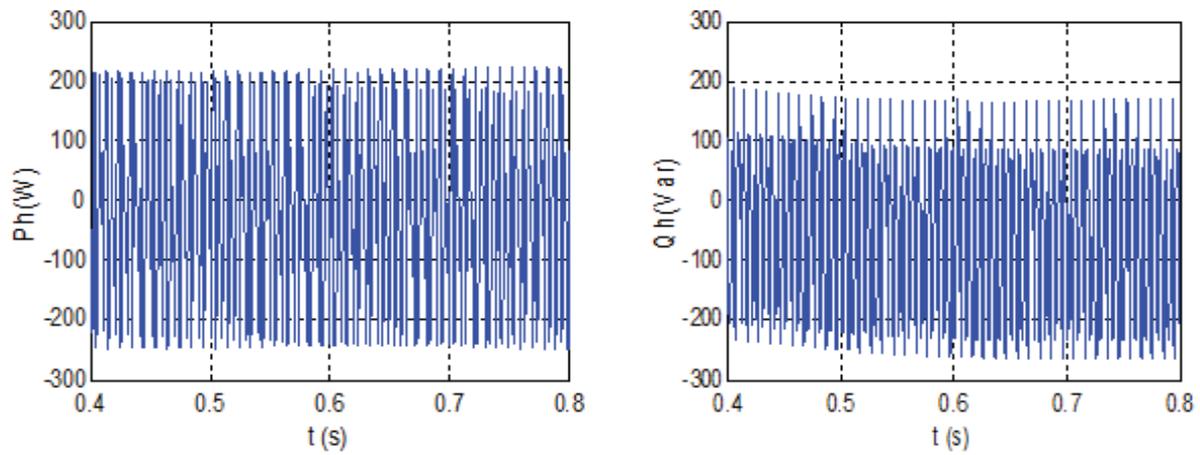
Figure 16 : Profil du vent imposé et vitesse de rotation de la machine



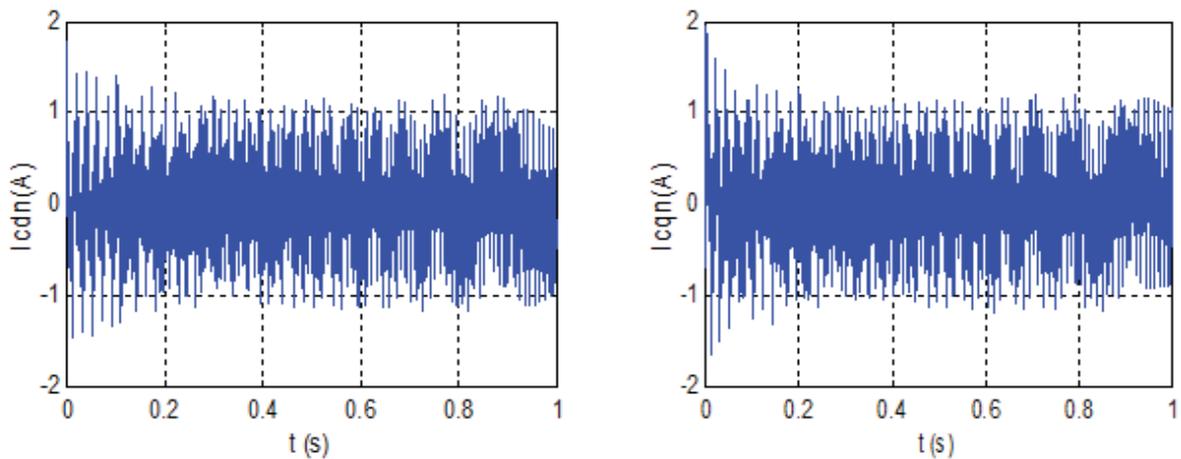
a) Puissances de référence et puissances réelles rotoriques



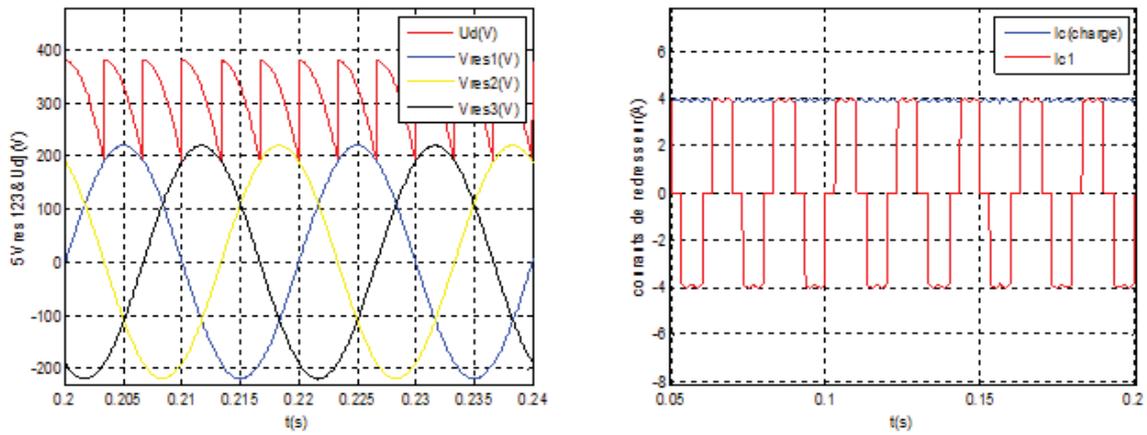
b) Tensions de référence et tension réelle de l'onduleur



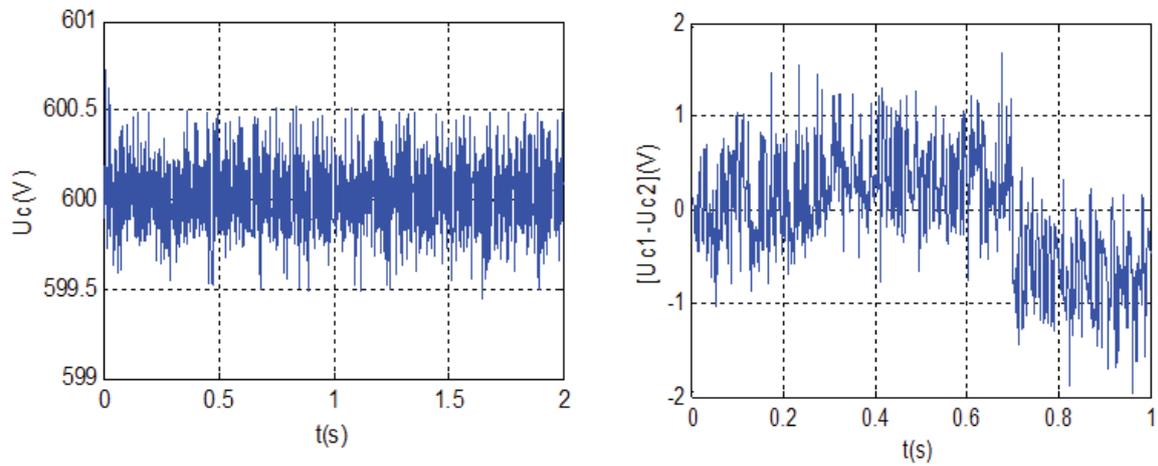
c) Puissances de la charge polluante



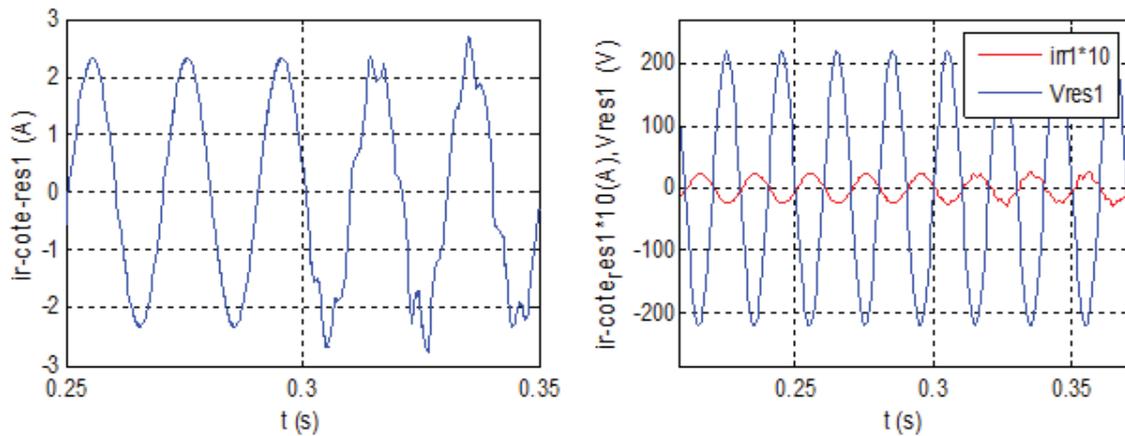
d) Courants de la charge polluante



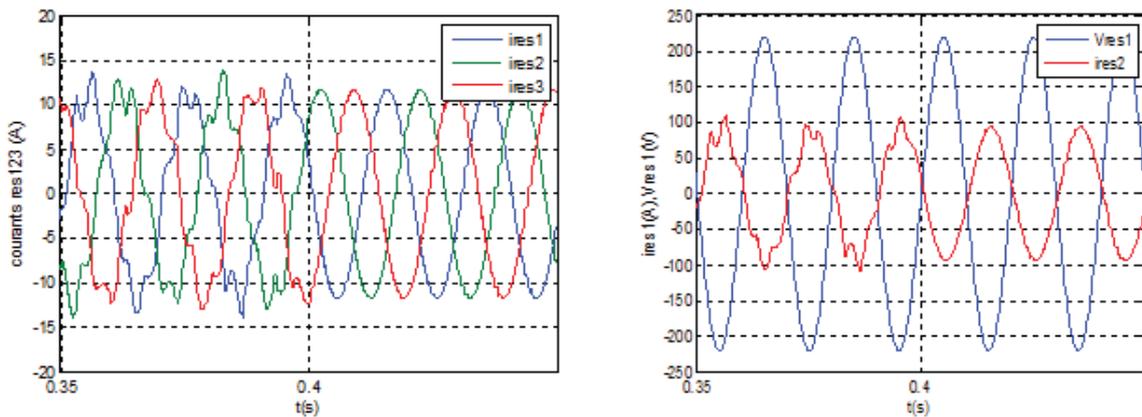
e) Tensions du réseau et courants du redresseur



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 17: 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.

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-sinusoidale, 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 sinusoidal.

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 sinusoidale.

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.

Bibliographie

Matlab/Simulink/R2007/bin/win32.

- [1] 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.
- [2] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Eoliennes », Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [3] Frederic Poitiers, « Etude et Commande des Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [4] P.Deflandre & P.Mouras, « Les harmoniques sur les réseaux électriques » Edition. Eyrolles, 1998.
- [5] 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.
- [6] M .Aissani, « 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.
- [7] Mesbahi Tedjani, « Gestion des flux énergétiques dans un système de conversion éolienne »Mémoire de magister, Ecole Militaire Polytechnique , Alger , 2011.
- [8] Thomas Ackermann , « Wind power in power system », Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2005.
- [9] A. Mirecki, « Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance », thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [10] Désiré Le Gouriere, « Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations », édition Eyrolles, 1982.
- [11] Y.Bencherif, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)», projet de fin d'études, ENP, 2008.
- [12] O . De Vries , « ON the theory of the horizontal axis wind turbine », Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [13] Hingorani, N. G.High « Power Electronics wind », IEEE Power Engineering Review, pp. 3-4, July 1988.
- [14] Nick Jenkins &Coll, « Electrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération ».
- [15] Jean-Christian Lhomme, « Les énergies renouvelables ».
- [16] Corinne Dubois, « Le guide de l'éolien, techniques et pratiques ».
- [17] F.Merrahi, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à double alimentation (Application à l'énergie éolienne)», thèse de magistère, ENP, 2007.

- [18] Michel Pluviose, « Conversion d'énergie par turbomachines : Eoliennes, turbines à gaz, cogénération, cycles combines gaz-vapeur... »
- [19] Khettache Laid, «Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée », thèse de Magistère, Université de Batna, 2007.
- [20] Bernard Multon, Equipe SETE «Aérogénérateurs électriques », Master recherche STS IST SPEE Paris11-ENS Cachan 2009, Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [21] EDF, «L'énergie éolienne »,2007.
- [22] B .François, «Intégration de l'énergie éolienne au réseau », Séminaire ‘‘Le développement des énergies éoliennes en Tunisie’’,19 Novembre 2009.
- [23] 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.
- [24] Paul-Etienne Vidal, «Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique de TOULOUSE, 2004.
- [25] 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.
- [26] Salma El Aimani, «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse Doctorat, Ecole Centrale de LILLE, 2004.
- [27] Leon Freris, David Infield, «Les énergies renouvelables pour la production d'électricité », Dunod, Paris, 2009.
- [28] A.Mericki, «Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petit puissance », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de TOULOUSE, Avril 2005.
- [29] I. Merzouk, « Commande d'un convertisseur AC/DC en régime déséquilibré » mémoire de magister, Ecole militaire polytechnique, 2008.
- [30] 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.
- [31] MICHEL PINARD, «Commande électronique des moteurs électriques ».
- [32] DESIRE LE GOURIERES, « Energie éolienne : Théorie, conception et calcul pratique des installations ».
- [33] 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.
- [34] P. Ferracci, « La Qualité de l'énergie électrique », Cahier technique de Schneider Electric CT 199, édition février 2001.
- [35] 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.
- [36] 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.

- [37] 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.
- [38] Tarak Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour on 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.
- [39] E. Bettega & J.N.Fiorina « Harmoniques : convertisseurs propres et composteurs actifs », Cahier technique de Schneider Electric CT 183.
- [40] 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.
- [41] C. Preve, « Les réseaux électriques industriels 2 », collection Lavoisier, 2005.
- [42] R. Calva, « Les perturbations électriques en BT », Cahier technique de Schneider Electric CT 141.
- [43] D. Fulchiron, « Surtension et coordination de l'isolement », Cahier technique de Schneider Electric CT 151, édition décembre 1992.
- [44] R. Wierda, « flicker ou scintillement des sources lumineuses », Cahier technique de Schneider Electric CT 151, édition décembre 1992.
- [45] CEI 61000-4-15, Compatibilité électromagnétique, partie 4 « Flicker mètre spécification fonctionnement et conception », Septembre 1998.
- [46] M.Allali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux électriques Basse tension », Thèse de Doctorat, Université de Luis Pasteur-Strasbourg, 2002.