



IV.1 Introduction

Cette application associera filtre actif et énergie éolienne: l'énergie du vent entraîne une turbine couplée à une génératrice asynchrone double alimentation dont les enroulements sont branchés à la sortie d'un filtre actif parallèle alimenté à partir d'un redresseur MLI, placé entre les enroulements statoriques et un réseau triphasé ; l'objectif est à la fois de contrôler les courants rotoriques et de limiter les perturbations harmoniques engendrées.

Des simulations numériques sous Matlab-Simulink permettront de valider les développements théoriques précédents.

IV.2 Description du montage

La Fig. IV.1 montre les composantes globales du système étudié. L'ensemble est constitué d'une turbine éolienne, d'une charge non-linéaire en pont de Graëtz à 6 thyristors produisant une pollution harmonique, d'une génératrice asynchrone double alimentation (GADA) , d'un réseau alternatif triphasé d'une puissance adaptée à celle de la machine, d'un filtre actif deux niveaux lié au rotor, et d'un redresseur MLI assurant l'alimentation DC du filtre actif à travers une capacité [31,32].

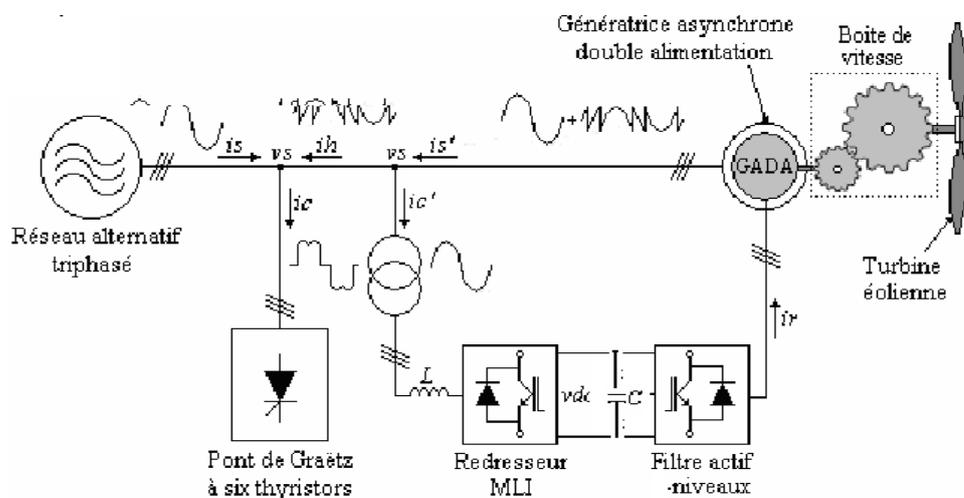


Figure VI. 1 Description générale d'un système à filtre actif lié à une turbine éolienne.

Avec:

i_s , courant de la source alternative triphasée, i_c , courant de la charge non-linéaire, i_c' , courant amont au redresseur MLI, i_s' , i_r courants statorique et rotorique de la MADDA, i_h , courant harmonique.

Le principe de fonctionnement de ce système est tel que la GADA produit un courant i_s' constitué d'une composante fondamentale sinusoïdale et d'une somme de composantes harmoniques. Pour alimenter le filtre actif raccordé sur le rotor de la machine, on utilise un redresseur MLI à absorption sinusoïdale dont le courant absorbé est i_c' . En aval de la source



alternative est branchée une charge non-linéaire produisant le courant i_c . En retranchant du courant i_c le courant i_h , le réseau garde un courant i_s d'une forme sinusoïdale. En accédant au rotor de la machine via le filtre actif, la régulation de la puissance active rentrant en jeu est possible.

L'onduleur alimentant le rotor de la MADA doit être lui-même alimenté par une tension continue. Ceci est assuré par un redresseur de tension liant le réseau à l'onduleur, les deux convertisseurs interposés entre le rotor et le réseau sont à deux niveaux et ils ont six interrupteurs (transistors IGBT) qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture.

Le stator de la génératrice est directement connecté au réseau. On a donc un système de production de forte puissance avec de l'électronique dimensionnée pour une puissance réduite, ce qui est intéressant en terme de coût et de fiabilité. Plusieurs études récentes montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien fonctionnant à vitesse variable [13], [33].

Pour alimenter en tension continue le convertisseur coté rotor, il faut mettre en œuvre un redressement, à partir de la tension du réseau. Une des contraintes majeures pour une machine asynchrone à double alimentation réside dans le fait que la puissance au rotor est bidirectionnelle selon que l'on est en fonctionnement hyper ou en hypo synchrone.

Le redresseur alimentant le convertisseur coté rotor doit donc être capable de faire transiter l'énergie électrique dans les deux sens en fonctionnement permanent. Il doit donc être bidirectionnel en courant. C'est principalement pour cette raison que nous mettrons en œuvre un redresseur à Modulation de Largeur d'Impulsions et pas un pont de diodes classique. Donc La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise le fonctionnement en hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

On va donc créer un bus de tension continue reliant l'onduleur coté rotor au redresseur MLI connecté au réseau. Ce bus est entièrement géré par le redresseur et possède une capacité de filtrage suffisante permettant d'avoir une tension stable et fixe quel que soit le fonctionnement de l'ensemble [8].

IV.2.1 Courants dans les différents nœuds

En appliquant les lois de Kirchhoff, les courants des différents nœuds s'expriment par:

$$\begin{aligned} I_s &= i_c - i_h \\ I_h &= i_s' - i_c' \end{aligned} \tag{IV.1}$$

IV.3 Génératrice asynchrone double alimentation

Le fonctionnement quatre quadrants d'une machine asynchrone double alimentation (MADA) est schématisé dans le diagramme de la Fig. IV.2 tel que P_s , P_r désignent les puissances absorbées ou fournies par le stator et le rotor de la machine. Lorsque le stator fournit de la puissance, la machine fonctionne en une génératrice (quadrants I et IV):

- ✚ hyper synchrone quand le rotor fournit une puissance (quadrant I),
- ✚ hypo synchrone quand le rotor absorbe une puissance (quadrant IV).[32]

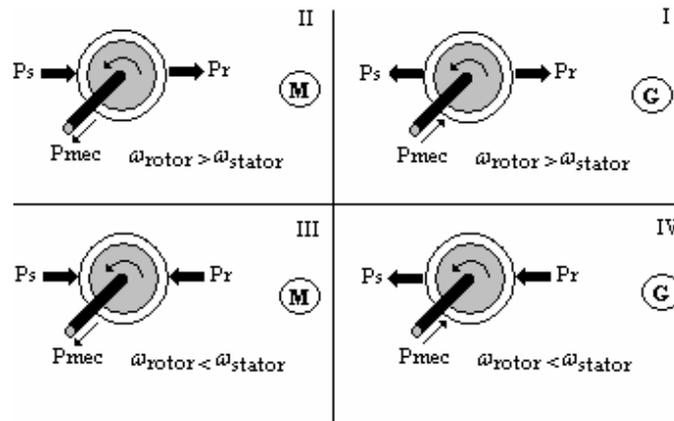


Figure VI. 2 Fonctionnement quatre quadrants d'une MADA[34]

IV.3.1 Machine asynchrone utilisée comme filtre actif

On se rend compte que l'onduleur de tension utilisé pour le filtrage est le même du point de vue structure que l'onduleur utilisée pour la commande de la MADA , en plus la machine 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 [35] [36] [37]

La figure IV 3 montre la structure permettant de filtrer les harmoniques de courants generés par des charges polluantes connectées au reseau. Il reste à developper la commande destinée au filtrage actif et à superposer celle-ci à la commande en puissance de la MADA.

C'est ici que la commande indirecte présente un avantage car elle integre une boucle de régulation des courants rotoriques il sera facile alors d'ajouter les courants harmoniques de reference par sipmle addition des courants .et nous obtiendrons les puissances desirées et les courants harmoniques à compenser .

Ceci nous ramene à concevoir un système permettant d'identifier les courants harmoniques absorbés par la charge non lineaire . il faudra tenir compte de la conversion entre courants rotoriques et statoriques pour pouvoir controler l'onduleur alimentant le rotor de la machine.

On commande la machine asynchrone afin qu'elle produise un courant sinusoïdal correspondant à la puissance qu'elle doit produire et un courant harmonique, correspondant au courant harmonique de la charge polluante. Ensuite, au niveau du raccordement de l'éolienne et de la charge polluante, la somme des courants donne un courant sinusoïdal vu du réseau qui se retrouve ainsi dépollué.[1]

IV.3.2 Complément sur le modèle de MADA

Nous allons établir les équations liant les courants harmoniques rotoriques et les courants harmoniques statoriques de la machine pour cela on rappelle les équations permettant de contrôler la machine asynchrone à double alimentation vu dans le chapitre précédent. [38]

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{M_{sr}}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent

$$\begin{cases} P = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rq} \\ Q = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (IV.3)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV.4)$$

Si l'on remplace maintenant dans l'équation (5.1) le flux statorique $\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ on obtient l'expression suivante pour les courants :

$$\begin{cases} i_{rd} = -\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right) i_{sd} \\ i_{rq} = -\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right) i_{sq} \end{cases} \quad (IV.5)$$

Les références de courant sont alors égales à la somme des courants nécessaires à la régulation des puissances et à la génération des courants harmoniques

$$\begin{cases} i_{rdtotal} = i_{rd} + i_{rdharmonique} \\ i_{rqtotal} = i_{rq} + i_{rqharmonique} \end{cases} \quad (IV.6)$$

Nous avons donc la relation qui permet de faire le lien entre les courants harmonique et la commande de l'onduleur alimentant le rotor :

$$\begin{cases} i_{rdharmonique} = -\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right) i_{sdharmonique} \\ i_{rqharmonique} = -\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right) i_{sqharmonique} \end{cases} \quad (IV.7)$$



dans l'équation précédente $i_{sdharmonique}$ et $i_{sqharmonique}$ correspondant aux courants harmoniques diphasés absorbés par la charge non linéaire on obtient le schéma de régulation suivante

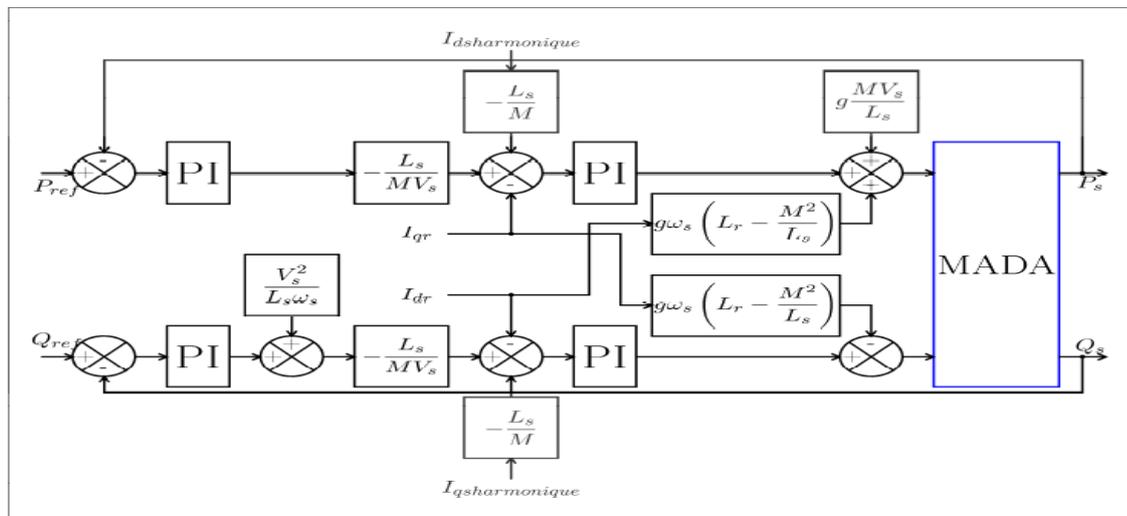


Figure VI. 3 schéma bloc de la régulation intégrant le filtre actif

Ce schéma comporte les sommateurs pour les références de courants harmoniques, le reste du schéma étant le même que celui de la figure III.6 (schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance).

On ajoute des références de courants harmoniques à la commande qui contrôle les courants générés par le convertisseur coté réseau comme montre la figure IV.4

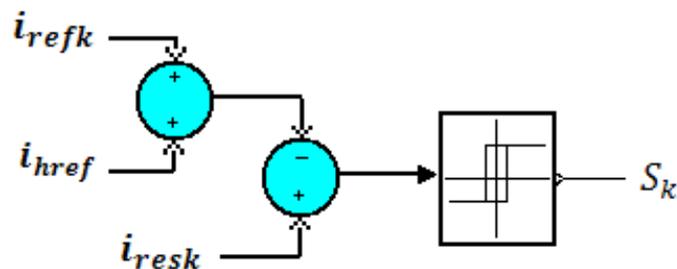


Figure VI. 4 Principe de la stratégie de commande par hystérisés pour le filtrage

Du fait que les éoliennes sont connectées sur le réseau de distribution, elles vont se trouver à proximité de charges polluantes. Il serait donc pratique de pouvoir utiliser les éléments qui permettent le fonctionnement et la régulation de l'éolienne afin de pouvoir la commander de manière à filtrer les harmoniques de courant. Ceci permettrait d'augmenter encore les services que pourrait offrir l'éolienne et permettrait de faire l'économie d'un filtre actif classique installé au point de raccordement où est déjà connectée l'éolienne.



IV.4 Détermination des références harmoniques

Le filtrage actif par la MADA se base sur la connaissance des courants harmoniques de référence que doit générer la MADA. L'identification des perturbations consiste à extraire l'information d'un signal donné, et ce, par séparation de la partie souhaitée (perturbation) du signal global.

On peut regrouper les différentes méthodes d'identification de courant harmoniques en deux familles :

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Ainsi, elle donne l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants.

Cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

La méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation.

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont été proposées :

- ✚ identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- ✚ Identification à partir de la détection du courant de la source,
- ✚ identification à partir de la détection de la tension de la source [39].



IV.4.1 Le filtre Passe-bas

Le diagramme fonctionnel de la figure (V.3) explique le principe de la détermination du fondamental du courant de charge par un filtre passe-bas dimensionné à une fréquence de coupure $f_c = 60$ Hz.

Pour le choix de l'ordre du filtre, il est à noter que, plus l'ordre n'augmente plus le transitoire du filtre est petit et le fondamental se rapproche plus de la sinusoïde. Pour cela on travaillé avec un filtre passif passe-bas d'ordre huit. L'inconvénient est la possibilité d'affectation de la stabilité et une augmentation du coût de réalisation

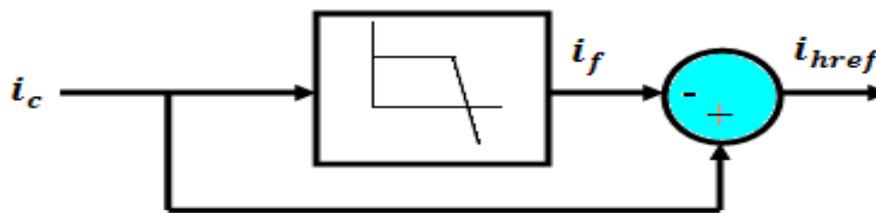


Figure VI. 5 Schéma fonctionnel du fonctionnement du filtre passe-bas

La fonction de transfert de ce filtre est:

$$F(p) = \frac{1}{(1 + \tau \cdot p)^n} \quad (IV.8)$$

Avec $\tau = \frac{1}{2\pi \cdot f_c}$ et n : ordre du filtre.

Il est à noter que malgré l'ordre du filtre est élevé il y a un retard du courant filtré par rapport au courant réel. Ce problème peut être résolu en utilisant un correcteur à avance de phase [40].

IV.4.2 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

IV.4.2.1 Principe de la méthode

Pour cette méthode, l'identification des courants harmoniques est réalisée par les puissances réelle et imaginaire instantanées par transformation des grandeurs électriques (tension, courant) dans un repère fixe par la transformée de Concordia.

Cependant, il y a lieu de signaler que cette méthode n'est pas une méthode d'identification directe des composantes harmoniques du courant mais identifie plutôt les composantes harmoniques qui ne servent pas à véhiculer de la puissance active.

La théorie (pq) met en œuvre une transformation d'un système de références stationnaire en coordonnées abc, à un système de coordonnées (α, β) . Elle correspond à une transformation



algébrique, connu sous le nom de la transformation de Clark, qui produit également un système de référence fixe, où les coordonnées (α, β) sont orthogonales les unes aux autres .

La transformation se fait à *partir de la relation suivante* :

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{res1} \\ I_{res2} \\ I_{res3} \end{bmatrix} \quad (IV.9)$$

$I_{res1} \ I_{res2} \ I_{res3}$ Étant les courants de ligne du système triphasé.

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{res1} \\ V_{res2} \\ V_{res3} \end{bmatrix} \quad (IV.10)$$

$V_{res1} \ V_{res2} \ V_{res3}$ Étant les tensions simples du système triphasé.

La puissance réelle instantanée p et la puissance réactive instantanée q peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$\begin{cases} p(t) = V_{res1} \cdot I_{res1} + V_{res2} \cdot I_{res2} + V_{res3} \cdot I_{res3} = V_{s\alpha} \cdot I_{s\alpha} + V_{s\beta} \cdot I_{s\beta} \\ q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} ((V_{res2} - V_{res3}) \cdot I_{res1} + (V_{res3} - V_{res1}) \cdot I_{res2} + (V_{res1} - V_{res2}) \cdot I_{res3}) = V_{s\alpha} \cdot I_{s\beta} - V_{s\beta} \cdot I_{s\alpha} \end{cases} \quad (IV.11)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (IV.12)$$

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \cdot \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (IV.13)$$

En séparant le courant dans le repère (α, β) en trois termes, actif, réactif à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques, on obtient :

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left(\begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \right) \quad (IV.14)$$

Avec :

$$- \Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$$

$$- \begin{cases} p = \tilde{p} + \bar{p} \\ q = \tilde{q} + \bar{q} \end{cases}$$



Chapitre IV : Filtrage actif par l'éolienne

\bar{p} et \bar{q} représentent les puissances continues instantanées active et réactive liée à la composante fondamentale du courant.

\tilde{p} et \tilde{q} représentent les puissances alternatives instantanées active et réactive liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

Les courants triphasés de référence sont obtenus par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} I_{c\text{ref}1} \\ I_{c\text{ref}2} \\ I_{c\text{ref}3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (IV.15)$$

La méthode des puissances instantanées possède les quelques caractéristiques suivantes :

Elle est une théorie inhérente aux systèmes triphasés.

- ✚ Elle peut être appliquée à tout type de systèmes triphasés (équilibré ou déséquilibré, avec ou sans harmonique).
- ✚ Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- ✚ Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif.
- ✚ Méthode de calcul simple (elle n'est composée que d'expression algébrique et peut être implémentée à l'aide d'un processeur standard).[41]

IV.4.2.2 Identification avec compensation de l'énergie réactive

La compensation de l'énergie réactive consiste à rendre le déphasage entre le courant et la tension du réseau nul, c'est à dire un facteur de puissance unitaire. Pour cela, on identifie le courant de charge pour avoir la valeur du courant du filtre i_f qu'il faut ajouter pour que le courant délivré par la source soit sinusoïdal et en phase avec la tension.

$$i_f = i_c - i_{res} \quad (IV.16)$$

- i_c Le courant d'entrée de la charge polluante.
- i_{res} : Le courant de réseau.

Le courant généré par le filtre doit être égal à la somme d'une composante harmonique i_{fh} (servant à dépolluer le réseau, autrement dit à éliminer les harmoniques), et une composante



fondamentale réactive \dot{i}_{ffr} (qui va servir à compenser l'énergie réactive, c'est-à-dire rendre le facteur de puissance unitaire). Donc il faut déterminer le courant réactif \dot{i}_{ffr} que le filtre actif doit générer pour compenser l'énergie réactive.

$$i_f = i_{ffr} - i_{fn} \quad (IV.17)$$

➤ **Détermination de courant réactif \dot{i}_{ffr}**

On utilise le même algorithme d'identification pour déterminer le courant réactif:

$$\begin{bmatrix} I_{fr\alpha} \\ I_{fr\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{S\alpha} & -V_{S\beta} \\ V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} \quad (IV.18)$$

Par l'application de la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} I_{fr1} \\ I_{fr2} \\ I_{fr3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & +\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{fr\alpha} \\ I_{fr\beta} \end{bmatrix} \quad (IV.19)$$

Pour neutraliser cette puissance réactive, on somme le courant harmonique généré par la charge avec le courant réactif désigné par \dot{i}_{ffr} pour permettre d'avoir le courant de référence que doit générer le filtre actif afin d'obtenir un courant de source sinusoïdal et en phase avec sa tension .

Donc :

$$\dot{i}_{fref} = \dot{i}_{ffr} + \dot{i}_{href} \quad (IV.20)$$

- \dot{i}_{fref} : Le courant de référence que doit générer le filtre actif.
- \dot{i}_{ffr} : Le courant réactif.
- \dot{i}_{href} : Le courant harmonique généré par la charge.

L'écart \mathcal{E}_k entre le courant réel du filtre actif \dot{i}_f et le courant du filtre de référence \dot{i}_{fref} permet la détermination des commandes des interrupteurs.

$$\mathcal{E}_k = i_{frefk} - i_{fk} \quad (IV.21)$$



Avec : $k=1, 2, 3$.

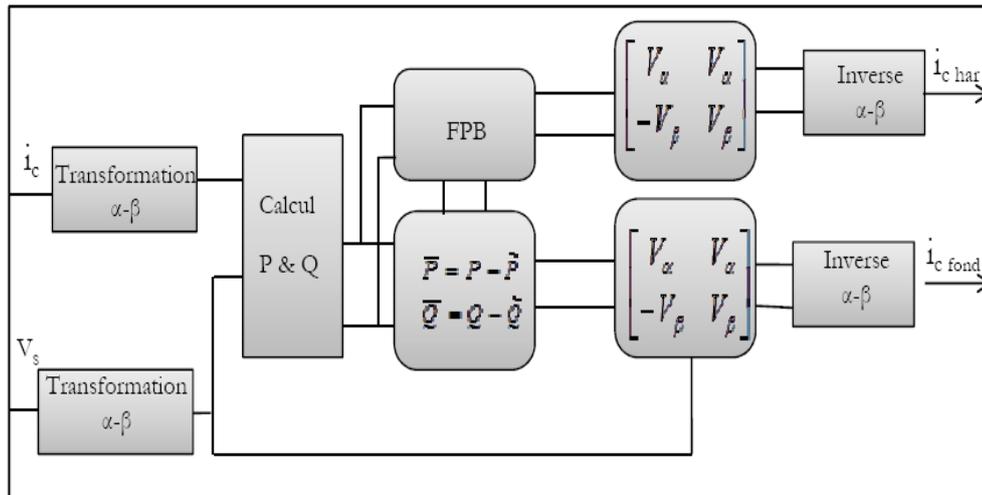


Figure VI. 6 Algorithme classique de la méthode des puissances active et réactive instantanées

Comme le montre la figure (IV.6), Le courant de source de référence déterminé par cette méthode est soustrait du courant de charge pour déterminer le courant de référence du filtre qui est comparé avec le courant réel généré par le filtre pour avoir la commande des interrupteurs du filtre actif.[13].

IV.5 Application du filtrage actif par la MADA à la charge non linéaire

Parmi les charges polluantes, on trouve les redresseurs triphasés à diodes et les redresseurs triphasés à thyristors qui dominent largement aujourd'hui dans le domaine industriel pour leur importance en nombre et en puissance.

Pour pouvoir filtrer ces harmoniques, il convient d'abord de les identifier. Une bonne identification de ces derniers nécessite la mobilisation de telles charges polluantes.

IV.5.1 Modélisation de la charge polluante

Le redresseur est alimenté par un réseau triphasé, représenté sur la figure (V.9). Il génère les harmoniques de courant d'ordre $6k \pm 1$

Selon la valeur de l'angle d'amorçage α des thyristors, on peut avoir le fonctionnement redresseur ou onduleur. Le thyristor Th1 est débloqué avec l'angle de retard α , donc pour $t = \alpha + \frac{\pi}{6}$



Chapitre IV : Filtrage actif par l'éolienne

Les autres thyristors sont débloqués de sixième de période en sixième de période dans L'ordre suivant : Th'3, Th2, Th'1, Th3, Th'2.

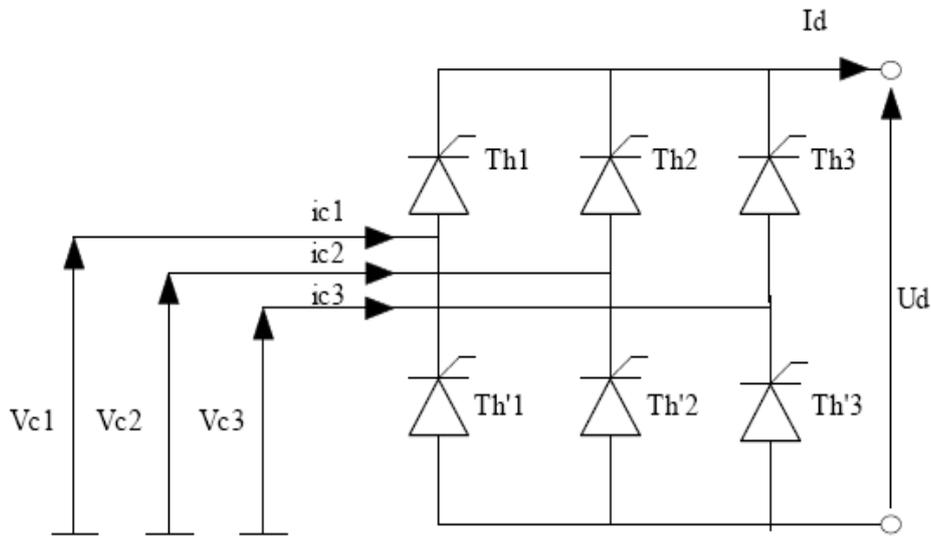


Figure VI. 7 schéma d'un redresseur triphasé à thyristors

En fonctionnement idéal des semi-conducteurs on résume les états de conduction de la tension redressée U_d et des courants ($i=1, 2, 3$) :

$$\begin{cases} i_{ci} = x_i \cdot I_d \\ U_d = \sum_{i=1}^3 x_i \cdot V_i \end{cases} \quad (IV.22)$$

- I_d : Courant redressé.
- V_i : Tensions de source.
- x_i : Les fonctions de conversion des semi-conducteurs. Elles sont données par :

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \alpha + \frac{\pi}{6} < \omega \cdot t < \alpha + 5 \cdot \frac{\pi}{6} \\ -1 & \alpha + 7 \cdot \frac{\pi}{6} < \omega \cdot t < \alpha + 11 \cdot \frac{\pi}{6} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (IV.23)$$

Les autres fonctions sont décalées de 120° et de 240° .

Dans la figure (V.8), on montre la forme d'onde de la tension redressée et le courant I_{c1} pour $\alpha=0$ (redresseur triphasé à diode).

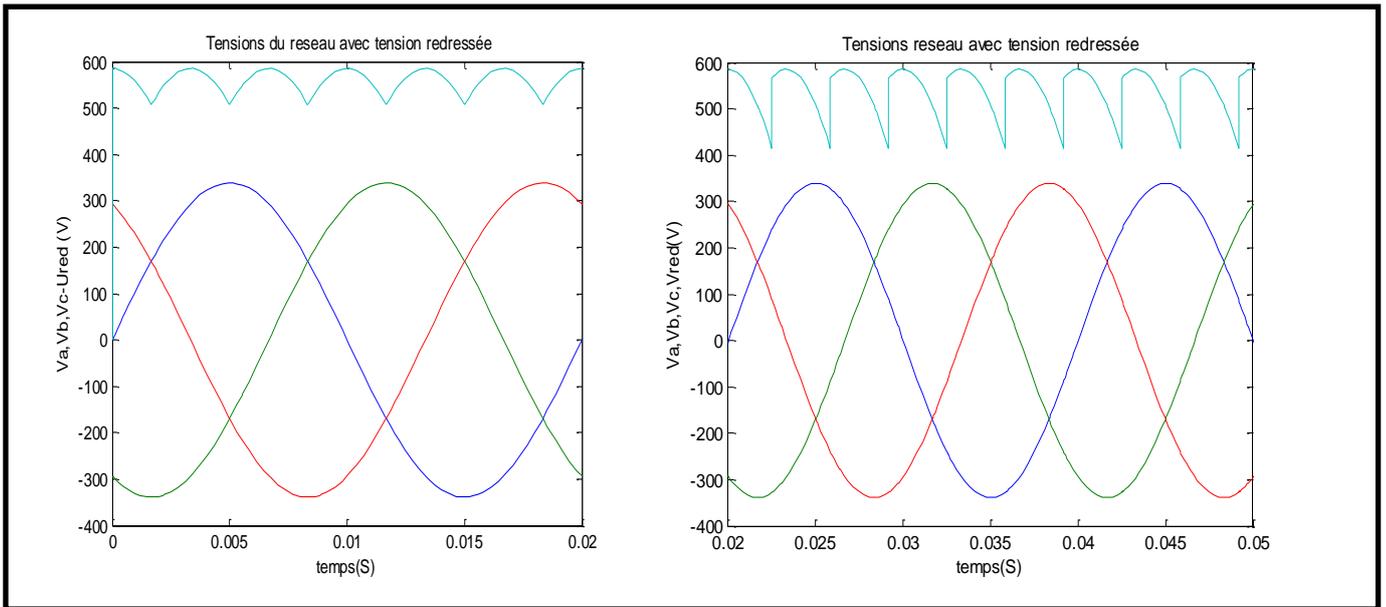


Figure VI. 8 tension redressée avec redresseur triphasé à diode et ci-contre avec thyristor

IV.6 Résultats de simulation

Les paramètres utilisés pour la machine asynchrone et sa régulation sont ceux utilisés dans le chapitre III .

Dans un premier temps nous avons simulé le réseau électrique avec production éolienne et sa charge non linéaire voir figure IV.9 sans filtrage pour voir l'effet des harmoniques sur l'allure du courant absorbé .nous présentons les résultats pour une phase .

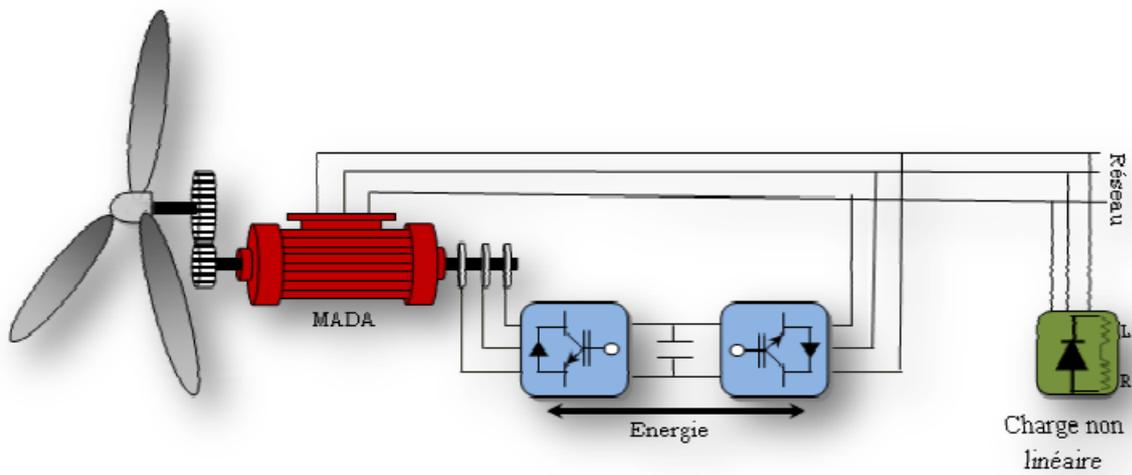


Figure VI. 9 Schéma du système étudié

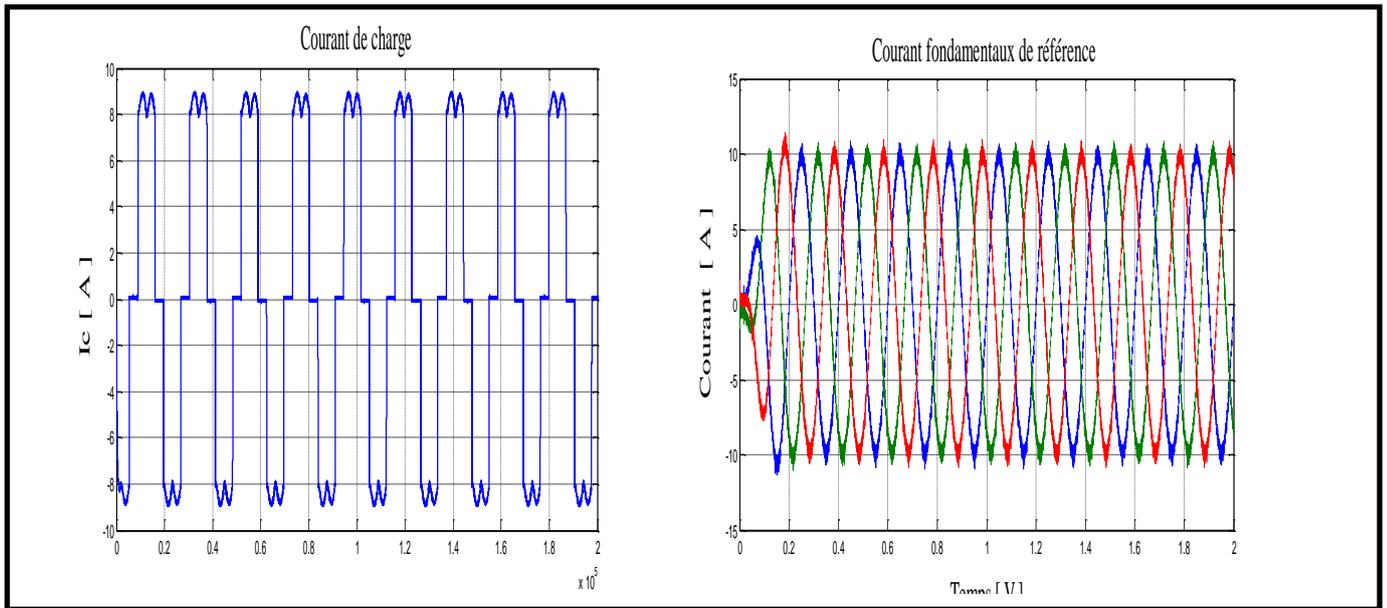


Figure VI. 10 Courant de charge et courant fondamentaux de référence

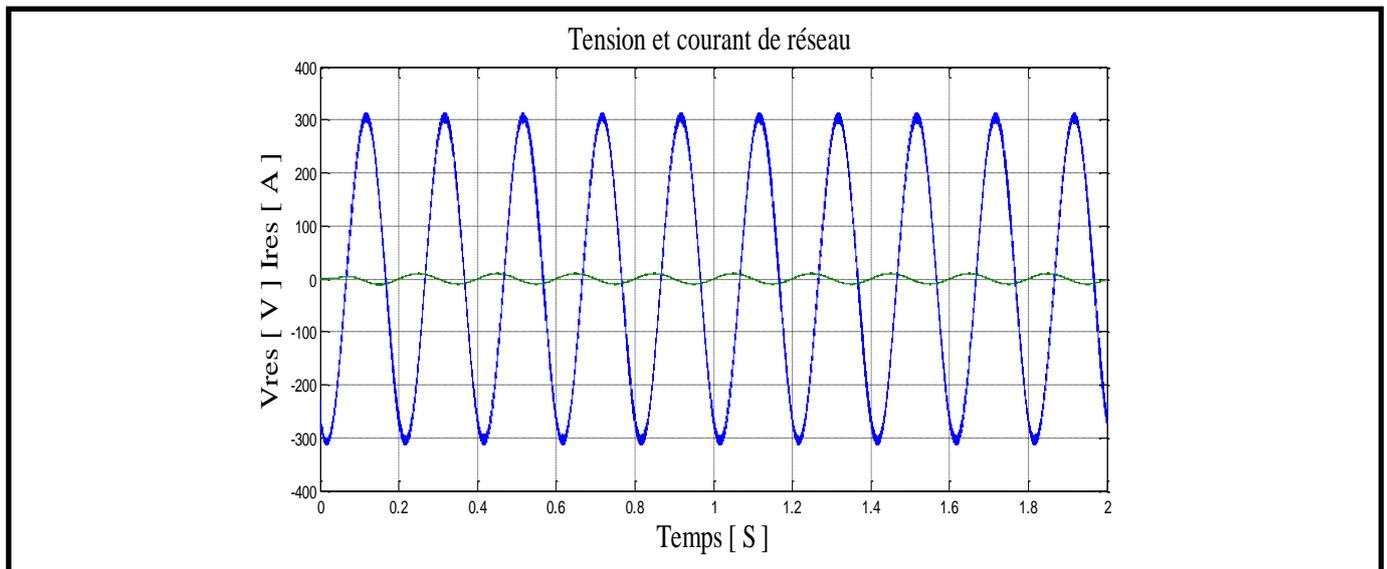


Figure VI. 11 Tension et courant de réseaux

Les figures précédentes présentent le courant de source ainsi que le courant absorbé par la charge polluante. le THD pour cette charge est de 28.93% c'est le cas d'un redresseur triphasé alimentant une charge RL ,le but du filtrage est de ramener le THD à une valeur inférieure à 5% comme l'impose la norme C.E.I.

Le déphasage entre la tension et le courant d'une phase indique un facteur de puissance non unitaire D'où nécessite de compenser l'énergie réactive

Maintenant nous allons présenter les résultats de simulation pour la cascade avec algorithme de commande de la MADA présenté précédemment comme filtre actif

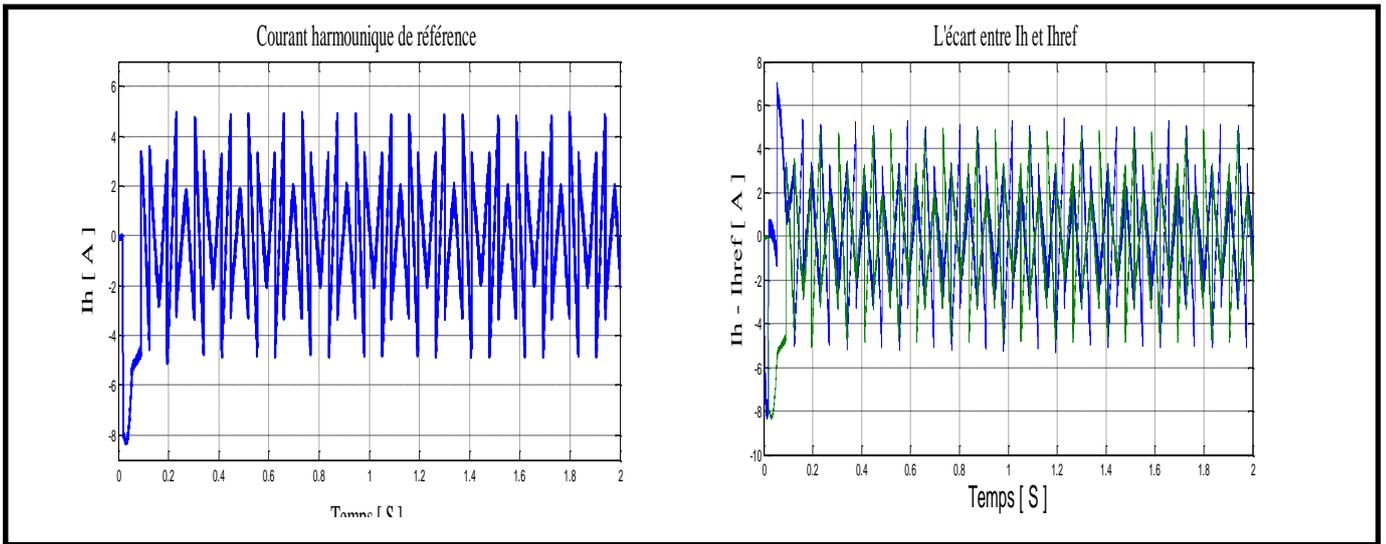


Figure VI. 12 courant harmonique de référence et l'écart entre courant harmonique et courant harmonique de référence

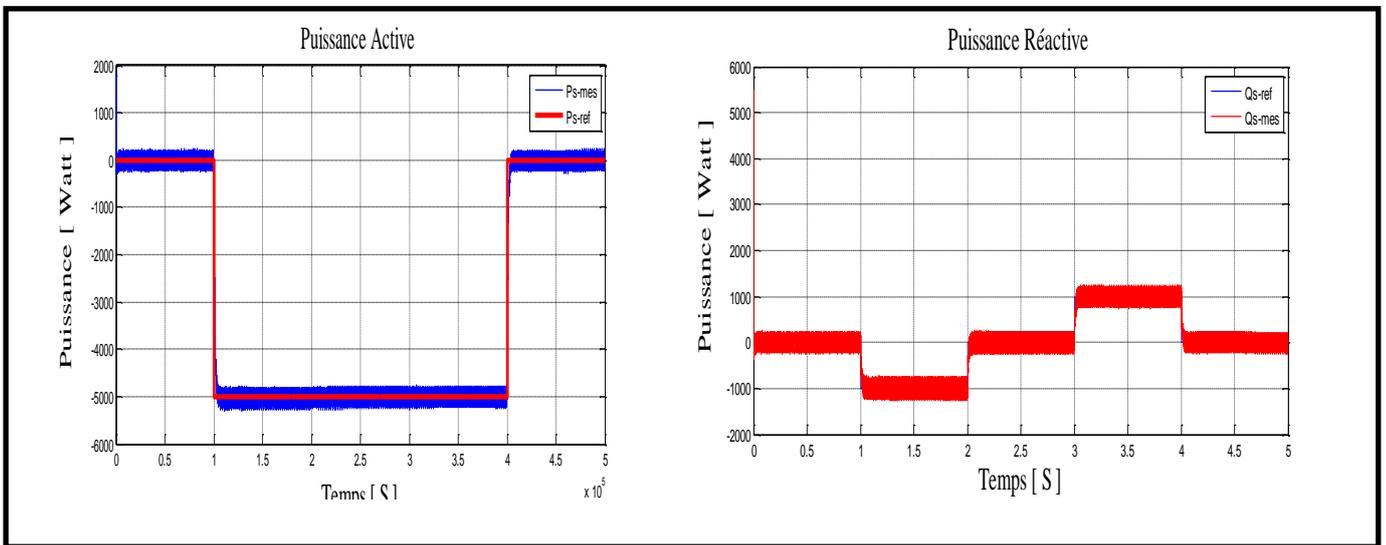


Figure VI. 13 La puissance active et réactive statorique

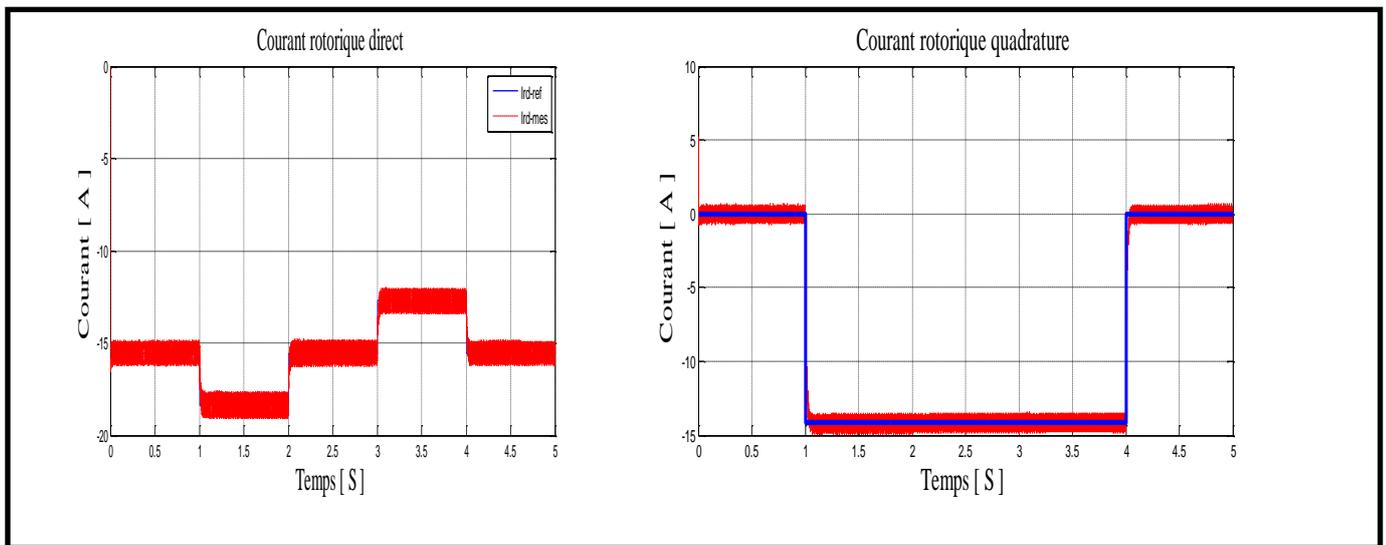


Figure VI. 14 Les courant rotorique direct et quadrature

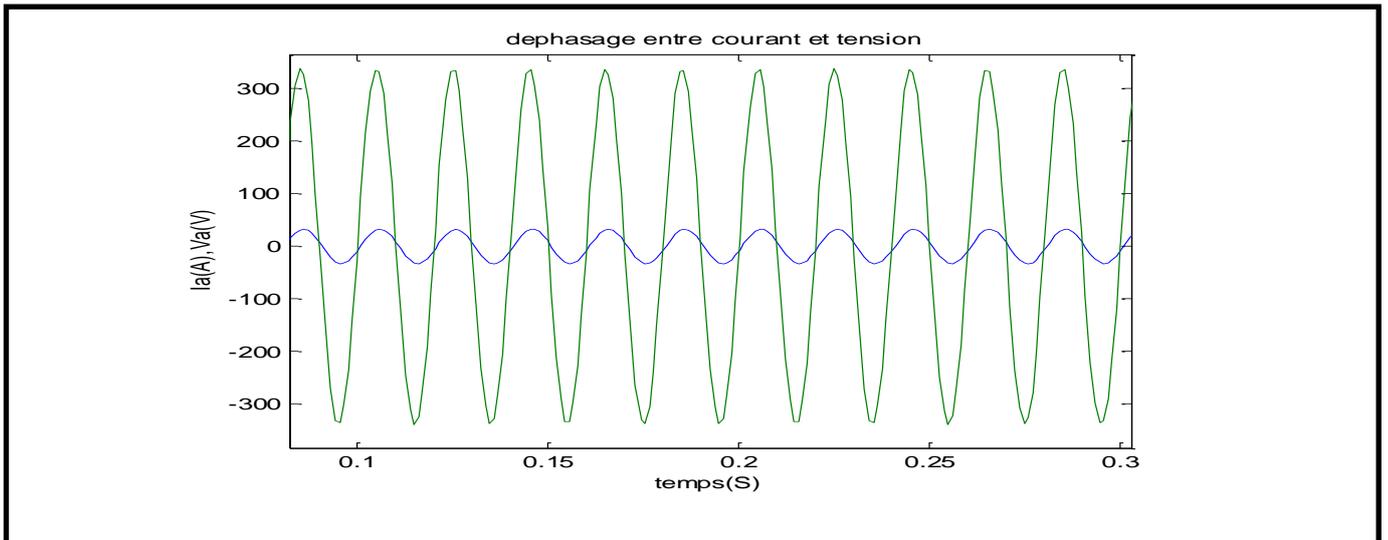


Figure VI. 15 Facteur de puissance corrigé du côté réseau alternatif

On a présenté dans ce chapitre, les différents composants de la cascade liant le réseau au rotor de la MADA. On a commencé d'abord par l'étude du convertisseur coté réseau. Ce dernier nous a permis la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la MADA.

De manière générale, il est constaté que le but de cette commande est atteint car la tension du bus continu se stabilise autour d'une valeur proche de celle de sa référence. La MADA suit les consignes des puissances actives et réactives.

Le courant de source ainsi que le courant injecté par le filtre sont illustrés dans les figures .

Le THD du courant de source est réduit à 3.21% avec filtrage et le facteur devient unitaire, ce qui signifie une compensation de l'énergie réactive.



IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons étudié l'aspect qualité de l'énergie et nous nous sommes intéressés aux charges non linéaires qui génèrent des courants harmoniques.

On a présenté une méthode d'identification des courants harmoniques (méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées) et les algorithmes qui donnent les courants harmoniques de référence que le filtre actif doit générer.

Cette méthode est simple offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Elle permet facilement, le passage d'un calcul des puissances active et réactive instantanées à la détermination des composantes harmoniques du courant de charge. L'utilisation de la MADA comme filtre actif est intéressante car elle ne modifie pas la structure de la commande de la MADA et n'entraîne donc pas de modification de la structure de l'ensemble du système (la cascade).

En effet toute l'électronique de puissance est présente autour de l'éolienne à double alimentation .le filtrage actif des courants harmoniques avec cette machine est une option intéressante pour un cout raisonnable. de plus le fonctionnement en filtre actif n'entraîne pas de dégradation en puissance du système qui peut toujours assurer une puissance constante au réseau électrique