

Chapitre IV

Observateur par mode de glissement du redresseur PWM triphasé

IV.1. Introduction

Dans tout problème de commande pour certains systèmes la connaissance de toutes les variables d'état est une nécessité. L'utilisation des capteurs pour la mesure est possible mais entraîne une augmentation du coût et de l'encombrement du système, surtout lorsque le nombre de variables est grand. Il faut donc trouver une méthode qui permet de connaître l'état du système à partir de la connaissance des entrées et d'un nombre minimum de mesures. La fonction qui réalise la déduction du vecteur d'état à partir des connaissances des entrées et des sorties du système est appelée observateur [23].

Dans plusieurs applications dans le domaine de la commande, il est souhaitable d'avoir des estimateurs pour certains variables qui ne sont pas mesurables en raison des contraintes techniques ou économique, Par conséquent, le recours à un observateur est indispensable. L'observateur est un système dynamique auxiliaire qui reconstruit l'état du système, conçu initialement pour le cas linéaire et il est étendu récemment au cas non linéaire.

Le principe de base d'un observateur d'état est comparable à celui d'un régulateur servant à stabiliser l'erreur dynamique entre une consigne et une mesure. Dans le cas d'un

observateur, le correcteur correspond à la matrice de gain, on cherche alors une matrice de gain adéquate pour annuler l'erreur d'estimation d'état.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons particulièrement à l'observateur par mode glissant et à son application dans l'observation des tensions et des flux virtuel du réseau. Ces observateurs sont associés aux commandes VOC-mode de glissement et VFOC-mode de glissement afin de contrôler le redresseur PWM triphasé.

IV.2. Observabilité et observateurs

L'observabilité d'un processus est un concept très important en automatique. En effet, pour reconstruire l'état et la sortie d'un système, il faut savoir, a priori, si les variables d'état sont observables ou non.

En général, pour des raisons de réalisation technique, de coût, etc..., la dimension du vecteur de sortie est inférieure à celle de l'état. Ceci entraîne qu'à l'instant donné t , l'état $x(t)$ ne peut pas être déduit algébriquement de la sortie $y(t)$ à cet instant. Par contre, sous des conditions d'observabilité qui seront explicitées plus loin, cet état peut être déduit de la connaissance des entrées et sorties sur un intervalle de temps passé: $u([0, t]), y([0, t])$ [24].

Le but d'un observateur est de fournir avec une précision garantie une estimation de la valeur courante de l'état en fonction des entrées et sorties passées. Cette estimation devant être obtenue en temps réel, l'observateur revêt usuellement la forme d'un système dynamique.

Définition : On appelle observateur (ou reconstituteur d'état) d'un système dynamique (S) :

$$(S): \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (IV.1)$$

Un système dynamique auxiliaire (O) dont les entrées sont constituées des vecteurs d'entrée et de sortie du système à observer et dont le vecteur de sortie $\hat{x}(t)$ est l'état estimé. Telle que l'erreur entre le vecteur d'état $x(t)$ et $\hat{x}(t)$ tend asymptotiquement vers zéro. Le schéma d'un tel observateur est donné sur la figure (IV.1) [24].

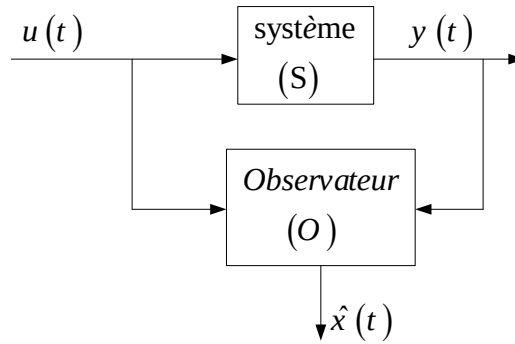


Figure (IV.1) : Schéma de principe d'un observateur

L'existence d'un tel observateur est liée à la notion d'observabilité de (S).

L'observabilité caractérise la propriété de pouvoir récupérer (de façon statique ou dynamique) par une combinaison des mesures et de leurs dérivées toutes les grandeurs d'un système.

IV.3. Observabilité des systèmes linéaires

Considérons le système dynamique linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

Les matrices A , B et C ont des dimensions appropriées.

La matrice d'observabilité du système (IV.2) est définie par :

$$M_o = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

L'observabilité du système (IV.2) est garantie si le rang de la matrice d'observabilité M_o est égal à n [25]. O'Reilly a présenté un deuxième critère; le système (IV.2) est complètement observable si [24]:

$$\text{rang} \begin{pmatrix} sI - A \\ C \end{pmatrix} = n \quad (\text{IV.4})$$

Si un système linéaire est complètement observable, il est globalement observable, c'est-à-dire que toutes les composantes du vecteur d'état du système sont observables, et donc peuvent être reconstruites par un observateur. Si le système est non linéaire, nous devons distinguer l'observabilité globale de l'observabilité locale.

IV.4. Observateur non linéaire

Considérons le système dynamique non linéaire suivant:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (IV.5)$$

Où les variables : x , u et y représentent respectivement l'état, l'entrée ou la commande et la sortie du système.

La plupart des observateurs qui existent dans la littérature ont la structure suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x}(t), u(t)) + \eta(y(t), \hat{x}(t)) \\ y(t) = h(\hat{x}(t)) \end{cases} \quad (IV.6)$$

C'est-à-dire une copie du modèle plus un terme correcteur $\eta(y(t), \hat{x}(t))$ qui établit la convergence de $\hat{x}(t)$ vers $x(t)$.

IV.5. Observabilité des systèmes non linéaires

Définition : Le système (IV.5) est génériquement observable si et seulement si :

$$\dim O_b = n$$

Cette condition est appelée condition de rang d'observabilité générique.

Tel que la matrice d'observabilité O_b est définie comme suit:

$$\begin{cases} O_b = \frac{d}{dX} \begin{bmatrix} L_f^0 h_p(X) & L_f^1 h_p(X) & \cdots & L_f^{n-1} h_p(X) \end{bmatrix}^T \\ p = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (IV.7)$$

$$\text{Avec : } L_f^0 h_p(X) = h_p(x)$$

Supposons que la condition de rang d'observabilité générique soit satisfaite. On peut alors vérifier :

$$\text{rang} \begin{pmatrix} dh \\ dL_f h \\ \vdots \\ dL_f^{n-1} h \end{pmatrix} = n \quad (IV.8)$$

Cela implique que l'état x peut être déduit de la connaissance de la sortie et d'un nombre fini de ses dérivées.

Un critère seulement suffisant est que le jacobien :

$$\frac{\partial(h, \dots, h^{n-1})}{\partial(x_1, \dots, x_n)} \quad (\text{IV.9})$$

Soit de rang plein.

IV.6. Observateur par mode glissant

La mise en œuvre des lois de commandes basées sur le modèle non linéaire du système, nécessite la connaissance du vecteur d'état complet du système à chaque instant. Cependant, dans la plupart des cas, seule une partie de l'état est accessible à l'aide de capteurs. Pour reconstituer l'état complet du système, l'idée repose sur l'utilisation d'un observateur. Un observateur est un système dynamique qui à partir de l'entrée $u(t)$ du système, de la sortie $y(t)$ mesurée, ainsi que d'une connaissance a priori du modèle, fournira en sortie un état estimé $\hat{x}(t)$ qui devra tendre vers l'état réel $x(t)$ [24].

Une des classes les plus connues des observateurs robustes est celle des observateurs par modes glissants [24].

Pour le système (IV.5), la structure de l'observateur par modes glissants s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{f}(\hat{x}, u) + G \operatorname{sgn}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \hat{h}(\hat{x}) \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

Dans ce cas, la surface de glissement est donnée par :

$$S(x) = y - \hat{y} \quad (\text{IV.11})$$

Le terme de correction utilisé est proportionnel à la fonction discontinue sgn appliquée à l'erreur de sortie. L'étude de la stabilité et de la convergence pour de tels observateurs, est basée sur l'utilisation des fonctions de Lyapunov.

L'étude de la stabilité et de convergence utilise les concepts de résolutions de Filippov ainsi que les méthodes dites du vecteur équivalent développées par Utkin pour la commande, et par Drakunov pour les observateurs [24].

Notre choix de ce type d'observateurs se justifie par les bonnes propriétés qui peuvent être obtenues et parmi lesquelles nous citerons :

- Une convergence en temps fini vers la surface de glissement $S(x) = y - \hat{y}$ si entre autre les conditions d'attractivité vers cette surface sont vérifiées ;
- Comme la fonction sgn est équivalente à un grand gain au voisinage de l'origine, nous obtenons une certaine robustesse vis-à-vis d'erreurs de modèle et de perturbations bornées.

IV.7. Observateur par mode glissement des tensions du réseau

Le modèle en courant du redresseur PWM triphasé est :

$$\frac{di_{\alpha,\beta}}{dt} = \frac{1}{L} (e_{\alpha,\beta} - Ri_{\alpha,\beta} - u_{c\alpha,\beta}) \quad (IV.12)$$

Le point de départ est de concevoir un observateur par mode de glissement du modèle en courant du redresseur dans le repère (α, β) , exprimé par [21] :

$$\frac{d\hat{i}_{\alpha,\beta}}{dt} = \frac{1}{L} (G_{1,2} \operatorname{sgn}(S_{\alpha,\beta}) - R\hat{i}_{\alpha,\beta} - u_{c\alpha,\beta}) \quad (IV.13)$$

Avec :

$S_{\alpha,\beta} = i_{\alpha,\beta} - \hat{i}_{\alpha,\beta}$: Vecteur surface de glissement dans le repère (α, β) ;

$G_{1,2}$: Vecteur de gain de l'observateur;

La soustraction entre l'équation (IV.12) et l'équation (IV.13) conduit à :

$$\dot{S}_{\alpha,\beta} = \frac{1}{L} (e_{\alpha,\beta} - G_{1,2} \operatorname{sgn}(S_{\alpha,\beta}) - RS_{\alpha,\beta}) \quad (IV.14)$$

$\hat{e}_{\alpha,\beta}$: Valeur équivalente de tension du réseau.

Quand le régime glissant est atteint $\dot{S}_{\alpha,\beta} = S_{\alpha,\beta} = 0$, les tensions du réseau estimées $\hat{e}_{\alpha,\beta}$ peuvent être exprimées à l'aide de l'équation suivante :

$$\hat{e}_{\alpha,\beta} = G_{1,2} \operatorname{sgn}(S_{\alpha,\beta}) \quad (IV.15)$$

Afin de minimiser l'effet de la fonction sgn sur l'estimation des tensions du réseau un filtre passe-bas (FPB) est indispensable. Dans un souci de simplifier l'algorithme d'estimation des tensions, un FPB de premier ordre est utilisé, comme le montre la figure (IV.2).

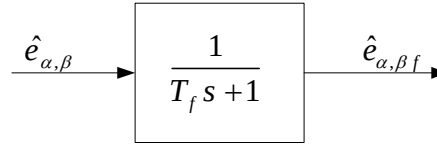


Figure (IV.2) : Schéma du filtre passe-bas des tensions du réseau

Les tensions estimées filtrées sont :

$$\hat{e}_{\alpha,\beta f} = FPB\left(G_{1,2} \operatorname{sgn}(S_{\alpha,\beta})\right) \quad (\text{IV.16})$$

La figure (IV.3) représente la structure de l'observateur par mode de glissement des tensions associé à un filtre passe-bas.

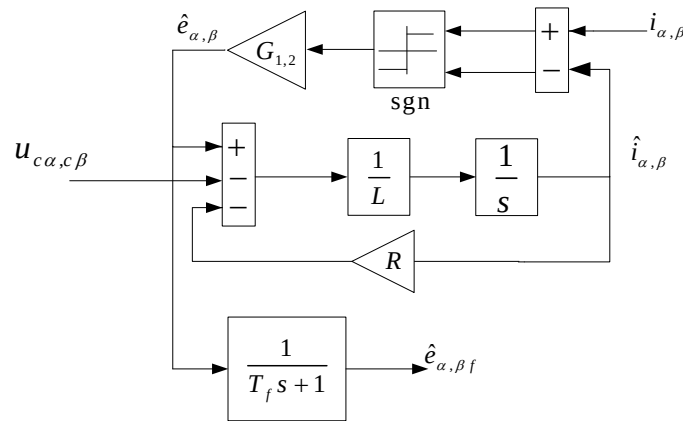


Figure (IV.3) : Observateur par mode de glissement des tensions associé un FPB

Les tensions de la source filtrées $\hat{e}_{\alpha,\beta f}$ peuvent être incorporées dans les schémas de commande du redresseur PWM triphasé.

IV.8. Commande VOC-mode glissant avec observation des tensions

Le schéma bloc de la commande du redresseur PWM par VOC-mode glissant avec observateur par mode de glissement des tensions est donné par la figure (IV.4).

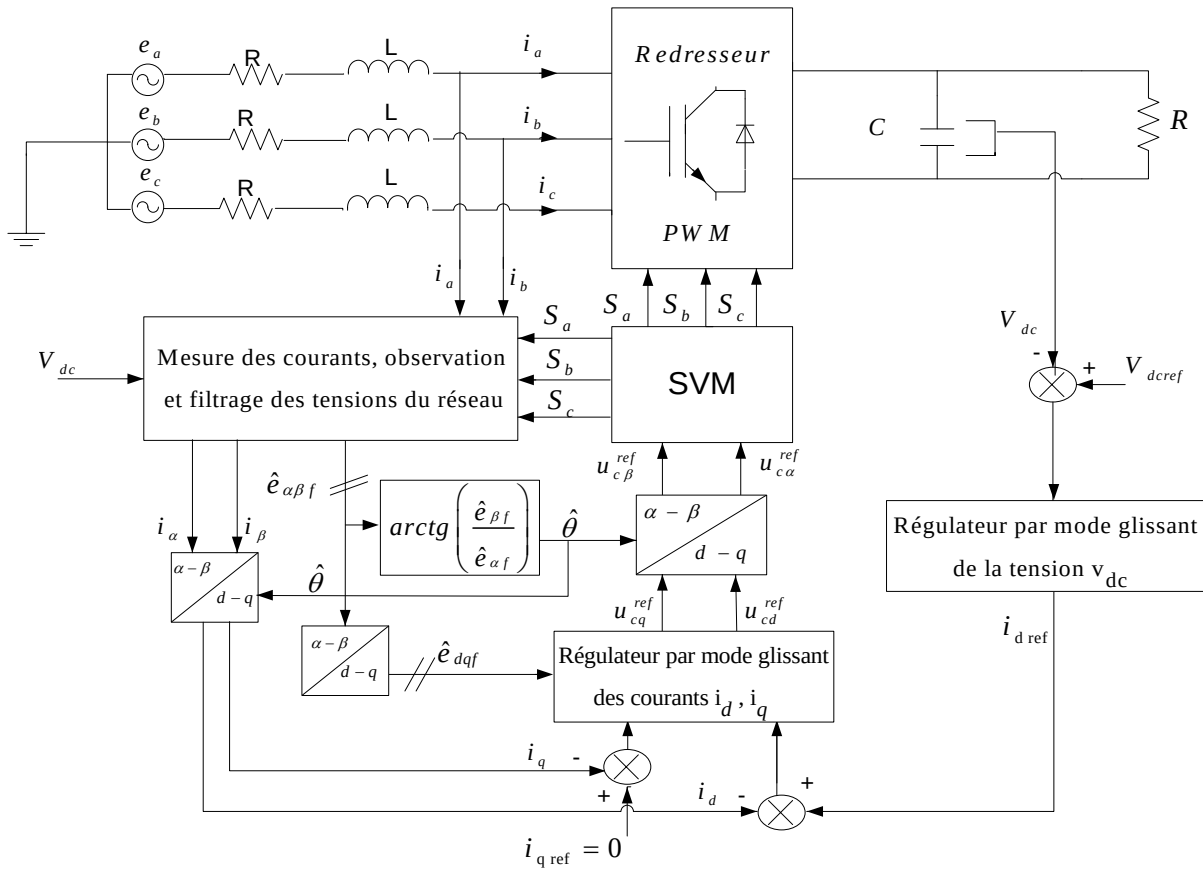


Figure (IV.4) : Schéma bloc de la commande VOC-mode glissant avec observateur

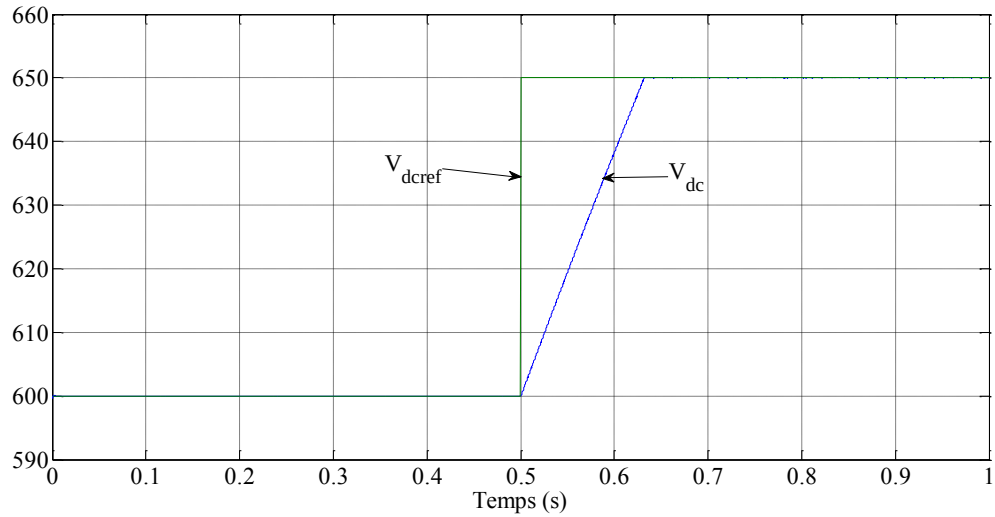
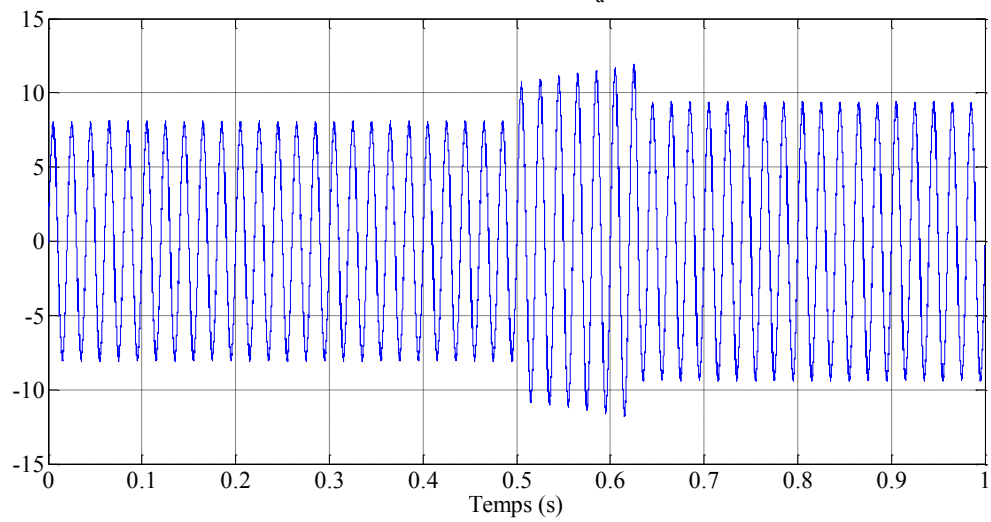
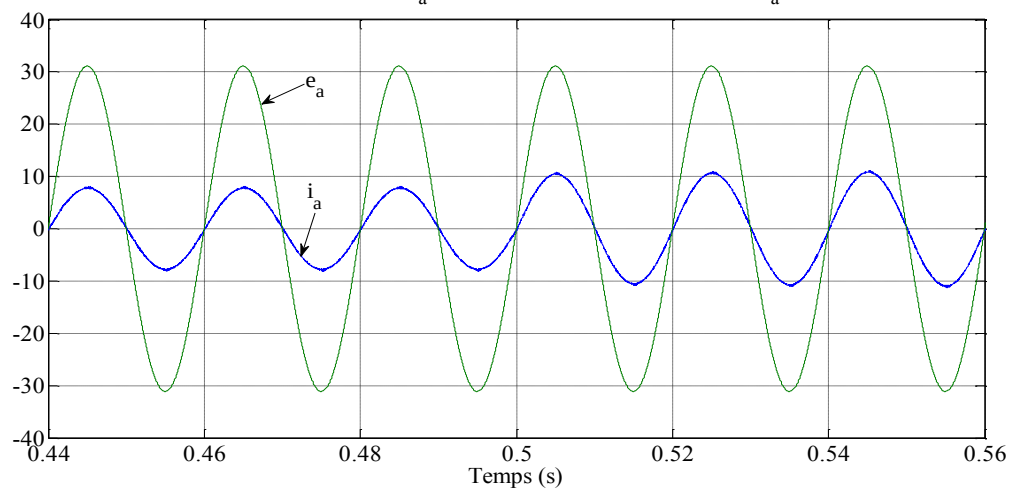
IV.9. Résultats de simulation

La simulation de la commande VOC-mode de glissement avec observateur des tensions est réalisée avec les mêmes paramètres de la VOC-mode de glissement avec estimation des tensions. Toutefois, les paramètres retenus pour l'observateur et le filtre passe-bas sont :

- Gains de l'observateur par mode de glissement : $G_1 = G_2 = 600$
- Constante de temps du filtre passe-bas : $T_f = 0.0001s$

IV.9.1. Comportement du redresseur alimenté par un réseau idéal

La figure (IV.5) montre la réponse du redresseur commandé par VOC-mode glissant avec observateur par mode glissant des tensions lors d'un changement de la référence de la tension de sortie de $V_{dc\ ref} = 600\ V$ à $V_{dc\ ref} = 650\ V$ à $t=0.5s$.

(a) Tension redressée v_{dc} et sa référence (V)(b) Courant de ligne i_a (A)(c) Courant de ligne i_a (A) et la tension de phase réduite e_a (V)

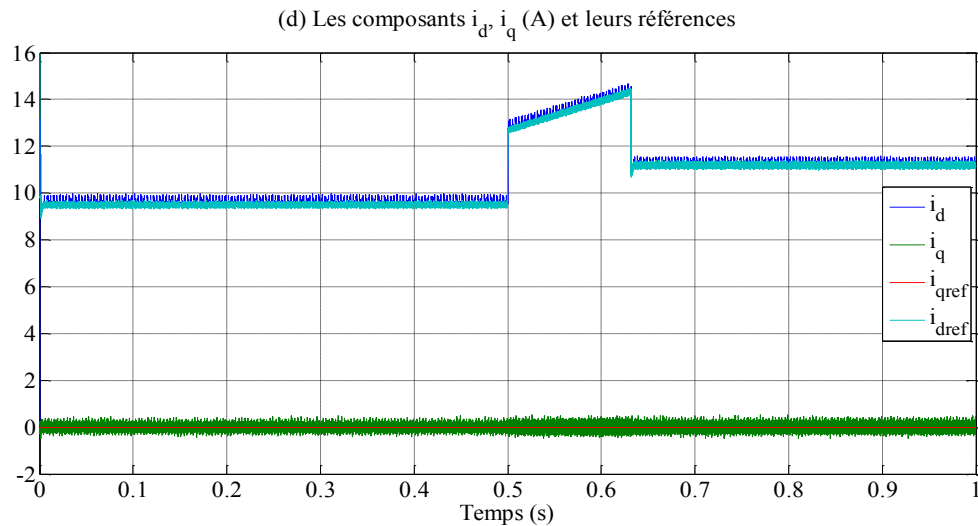
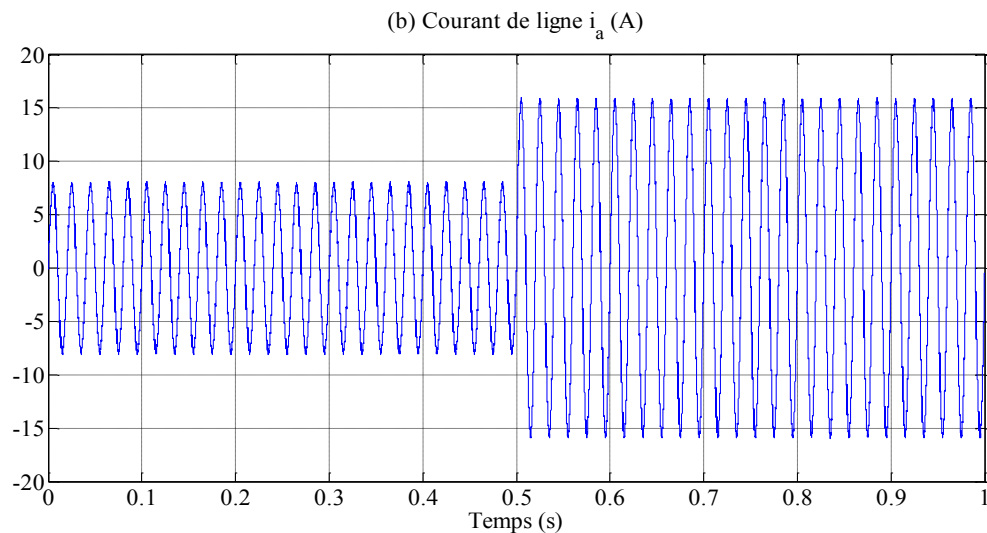
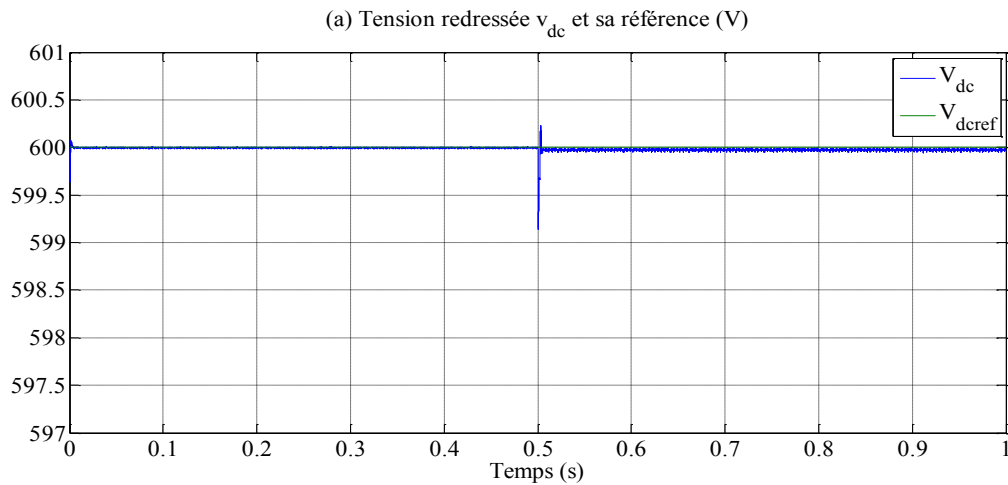


Figure (IV.5) : Performances du redresseur commandé par VOC-mode glissant avec observateur par mode glissant des tensions lors d'une variation de la tension de référence

La figure (IV.6) montre la réponse du redresseur lors d'une diminution de la résistance de charge de 100% à $t = 0.5s$.



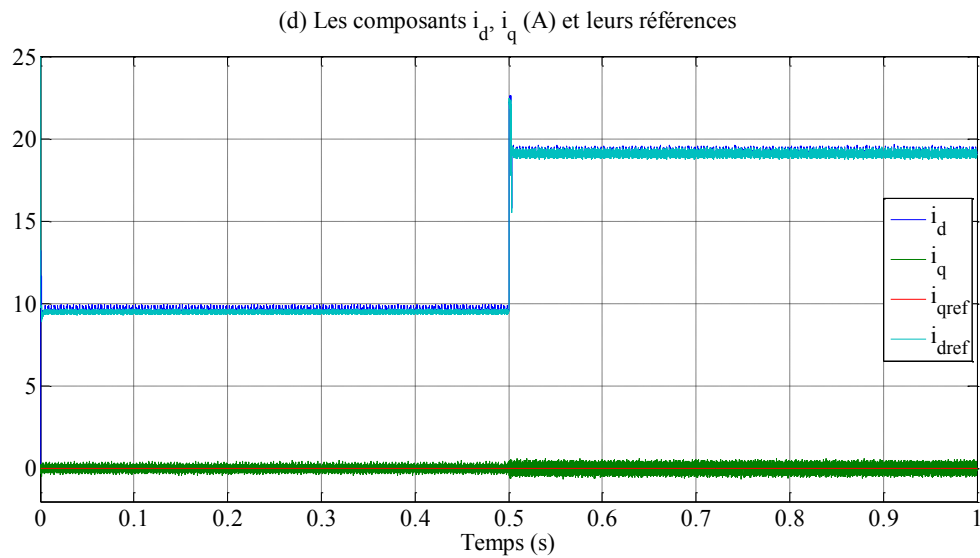
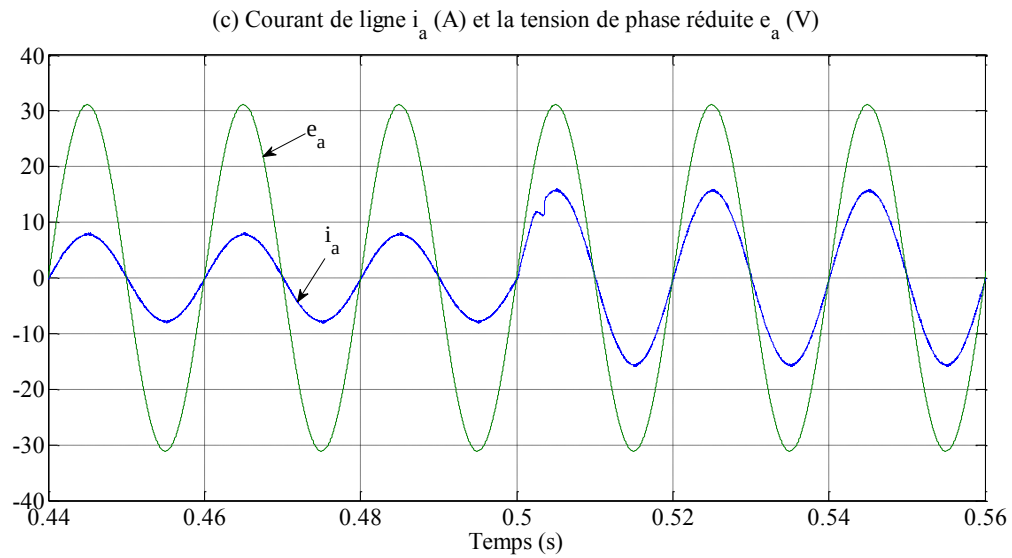


Figure (IV.6) : Test de robustesse vis-à-vis la variation de la résistance de charge

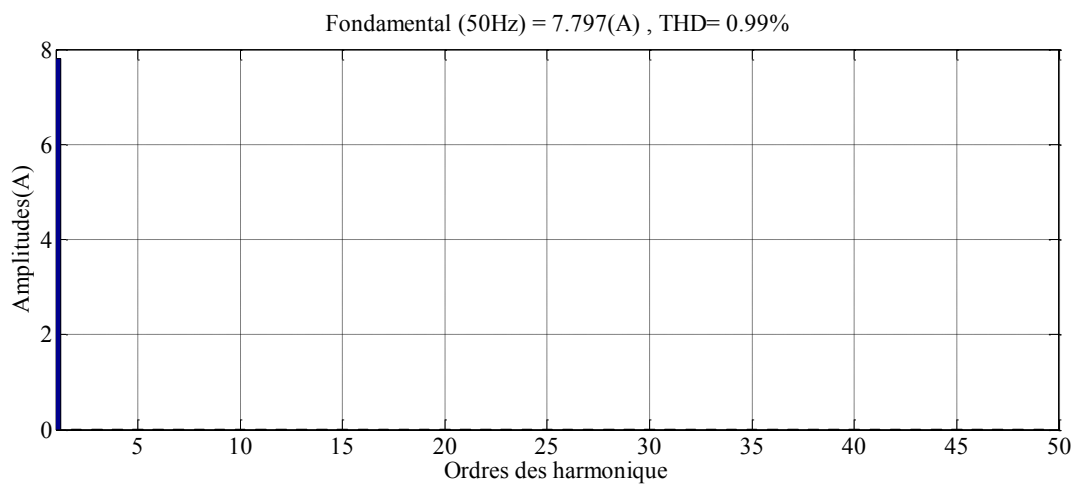


Figure (IV.7) : Spectre harmonique du courant de ligne

IV.9.2. Comportement du redresseur alimenté par un réseau perturbé

La figure (IV.8) montre la réponse du redresseur commandé par VOC-mode de glissement avec observateur par mode glissant des tensions avec une référence de la tension de sortie fixée à $V_{dc\text{ ref}} = 600\text{ V}$.

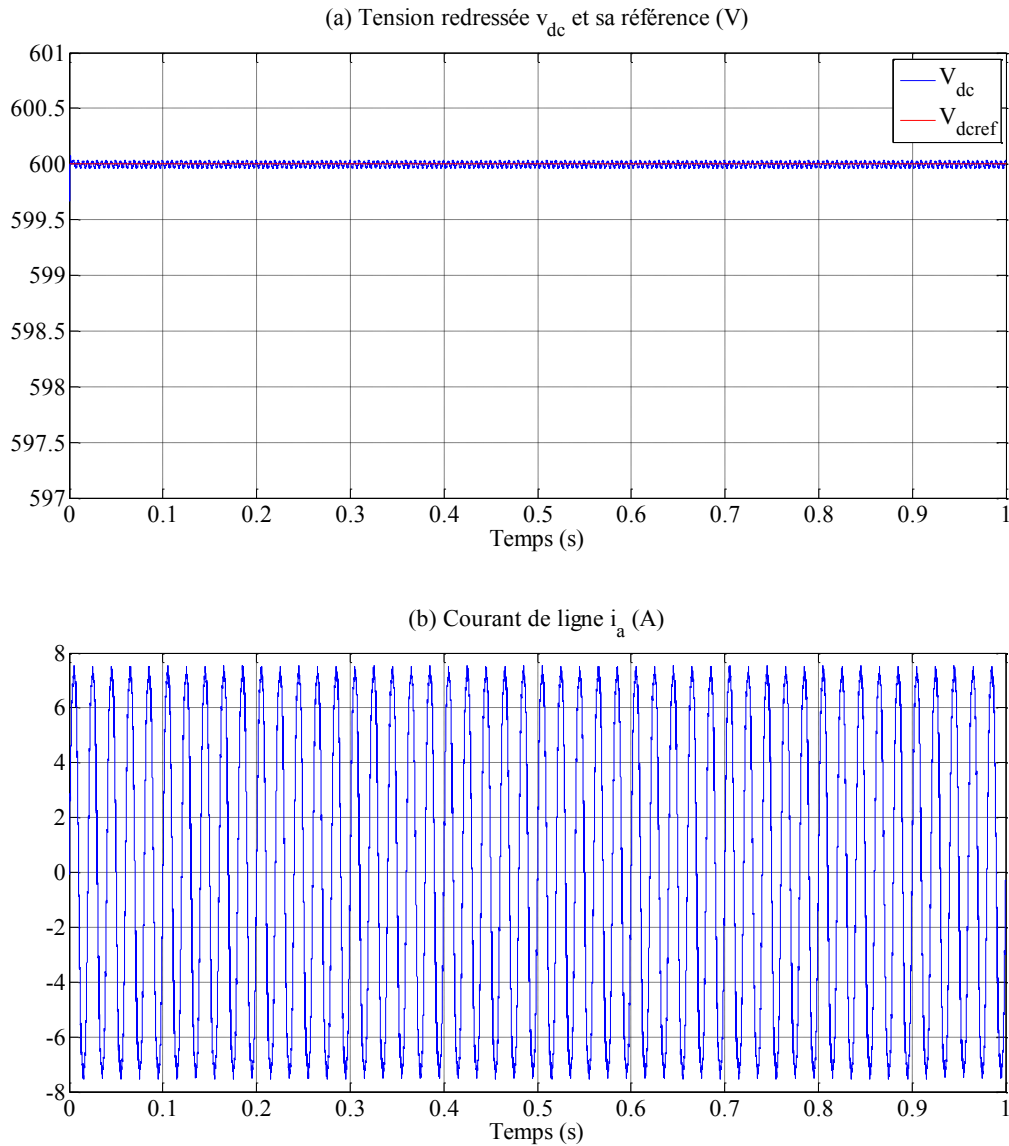


Figure (IV.8) : Performances du redresseur commandé par VOC-mode de glissement avec observateur par mode glissant des tensions et alimenté par un réseau perturbé

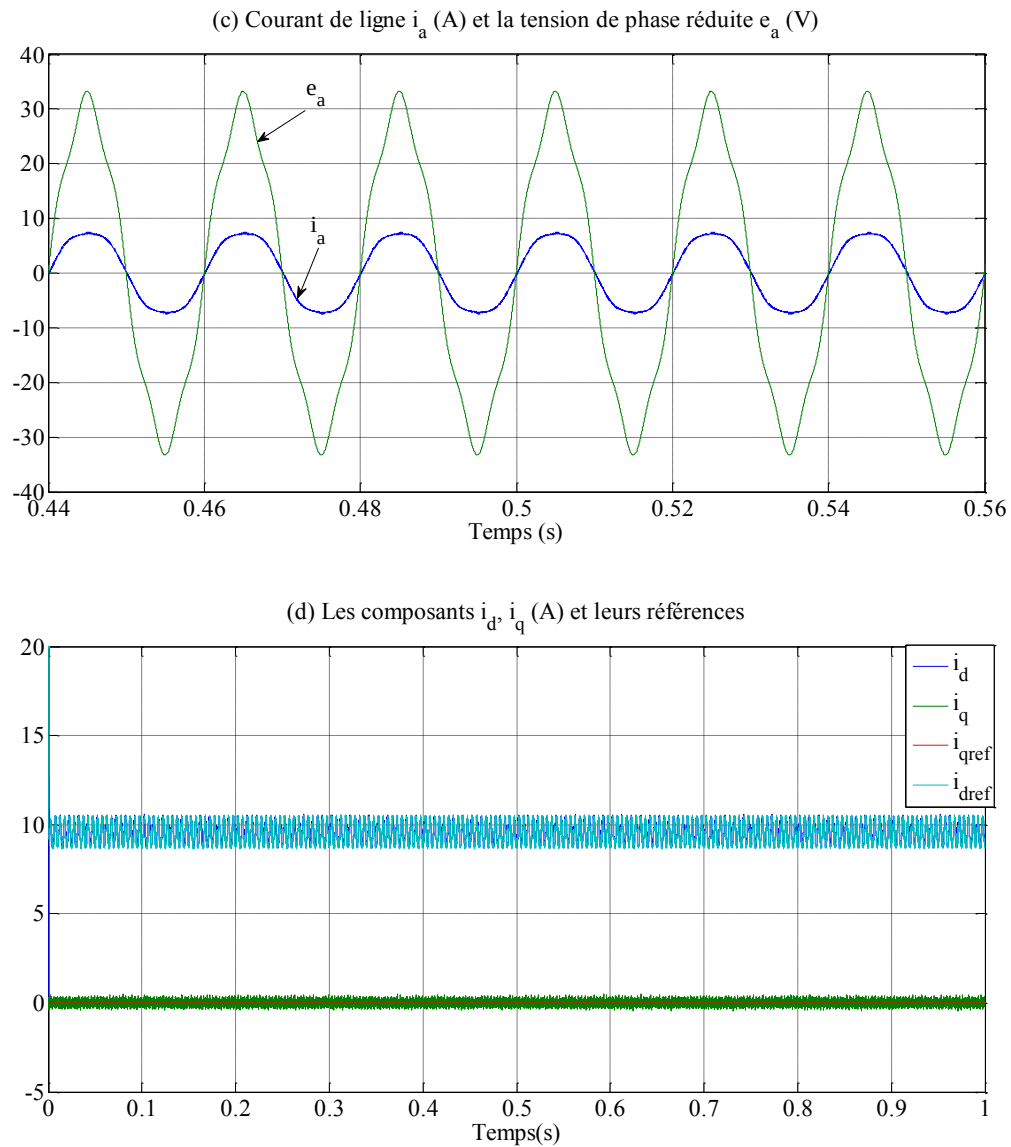


Figure (IV.8) : Performances du redresseur commandé par VOC-mode de glissement avec observateur par mode glissant des tensions et alimenté par un réseau perturbé

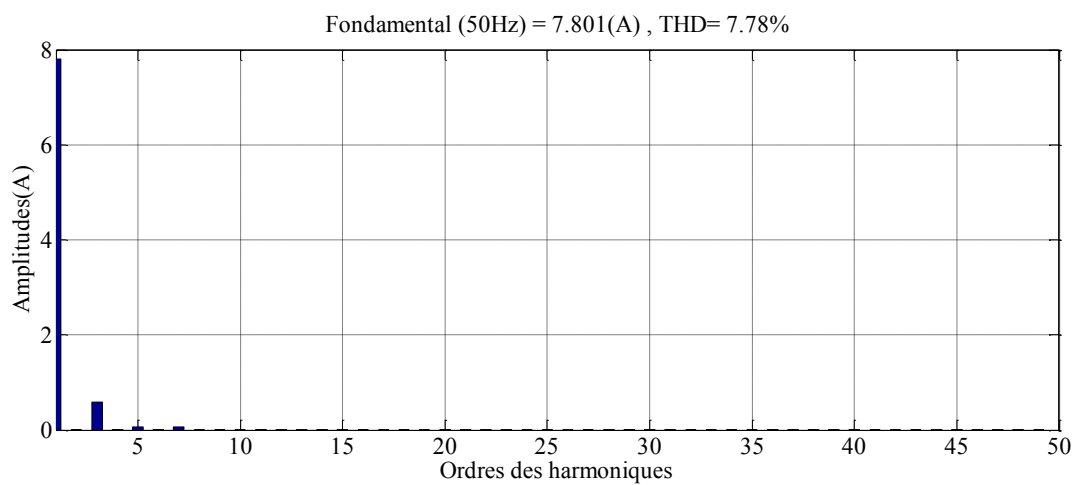


Figure (IV.9) : Spectre harmonique du courant de ligne fourni par un réseau perturbé

IV.10. Commande VFOC-mode glissant avec observateur par mode de glissement du flux virtuel

Le schéma bloc de la commande VFOC-mode glissant avec observateur par mode de glissement du flux virtuel du redresseur PWM est donné par la figure (IV.10).

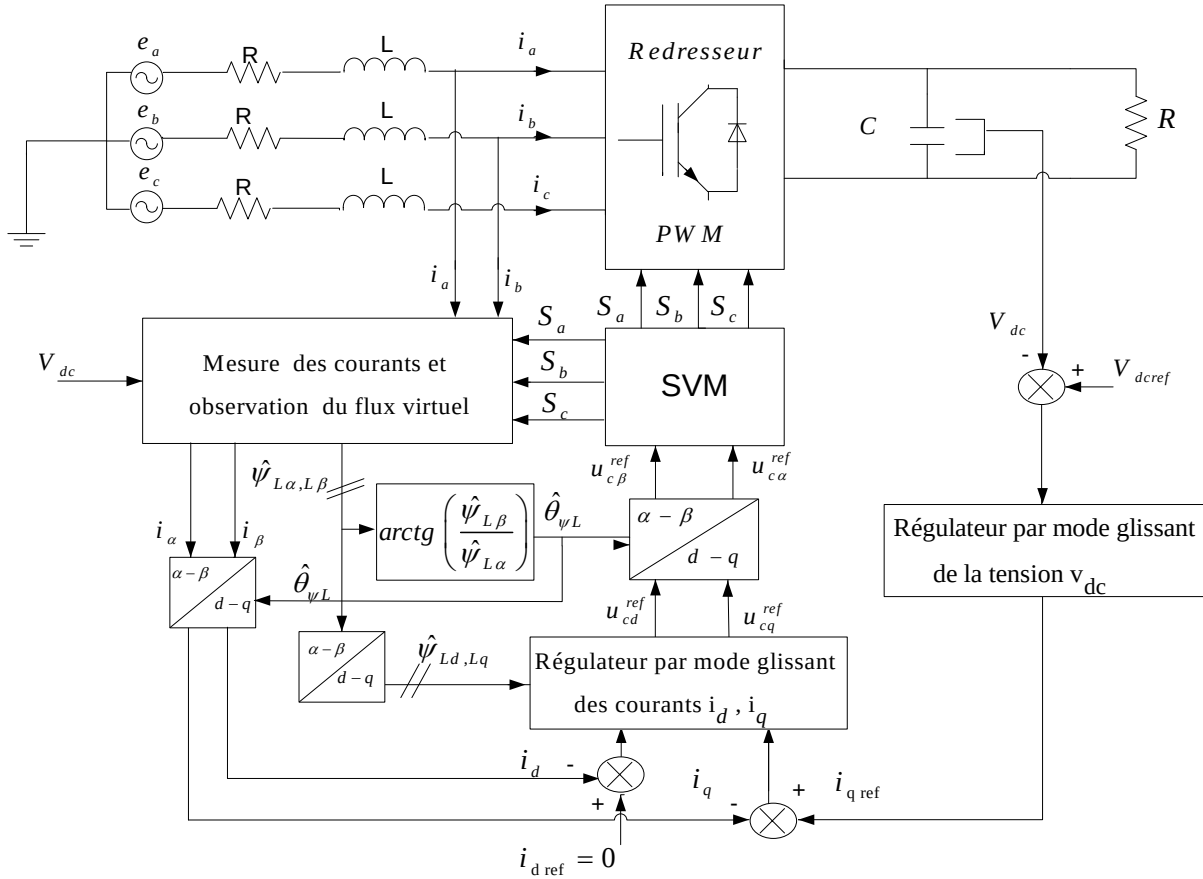


Figure (IV.10) : Schéma bloc de la commande VFOC-mode glissant avec observateur du flux virtuel

A partir de l'équation (IV.7), les composantes du flux virtuel $\hat{\psi}_L$ sont estimées comme suit :

$$\begin{cases} \hat{\psi}_{L\alpha} = \int \hat{e}_\alpha dt \\ \hat{\psi}_{L\beta} = \int \hat{e}_\beta dt \end{cases} \quad (IV.17)$$

IV.11. Résultats de simulation

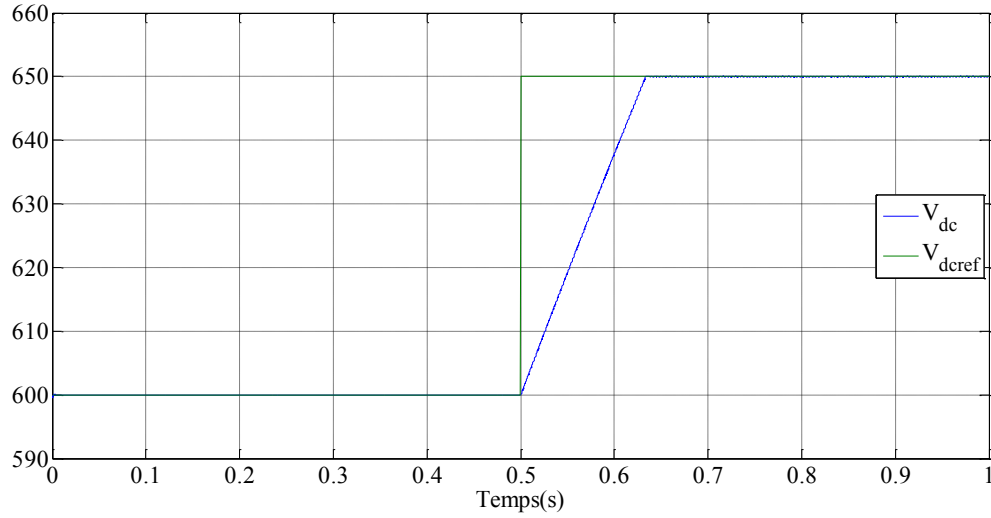
La simulation de la commande VFOC-mode de glissement avec observateur des flux virtuels est réalisée avec les mêmes paramètres de la VOC-mode de glissement avec estimation du flux virtuel.

IV.11.1. Comportement du redresseur alimenté par un réseau idéal

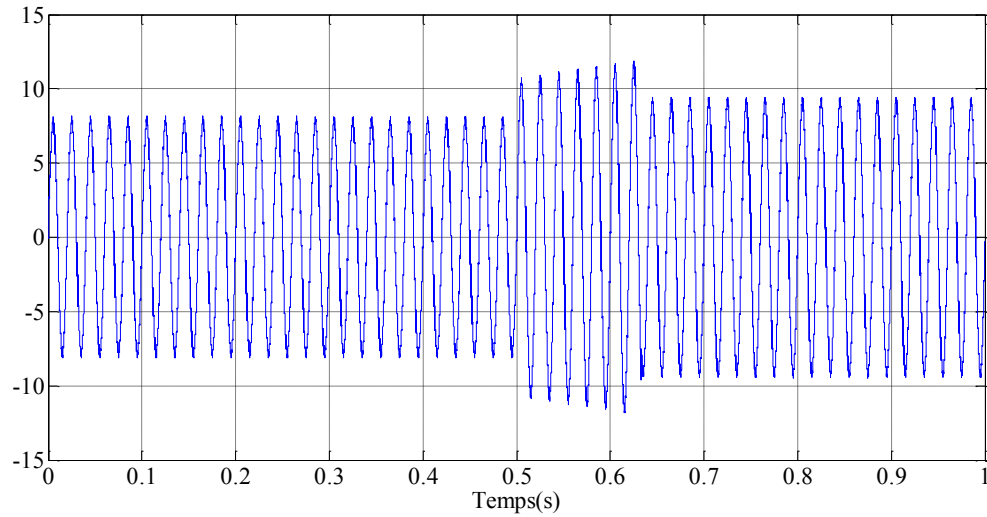
La figure (IV.11) montre la réponse du redresseur commandé par VFOC-mode glissant avec

observateur par mode glissant du flux virtuel lors d'un changement de la référence de la tension de sortie de $V_{dc\text{ ref}} = 600\text{ V}$ à $V_{dc\text{ ref}} = 650\text{ V}$ à $t=0.5\text{s}$.

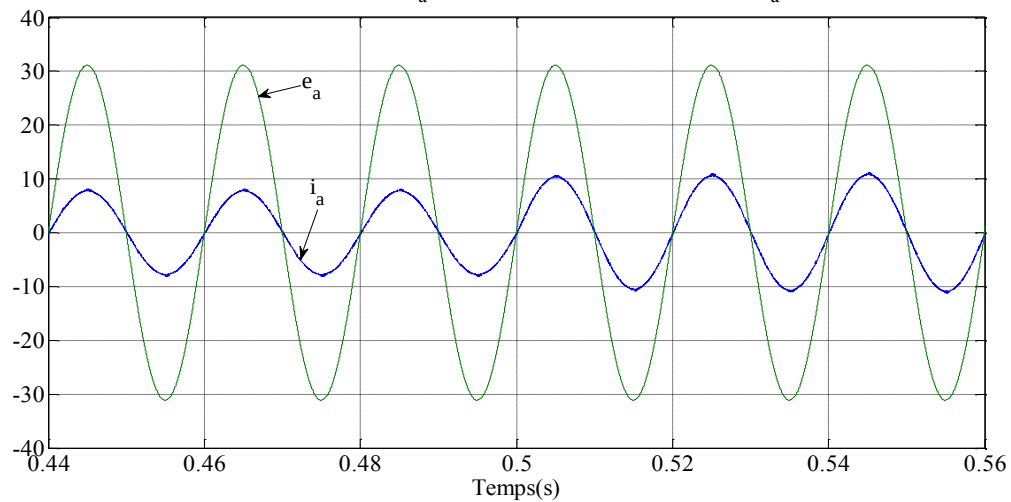
(a) Tension redressée v_{dc} et sa référence (V)



(b) Courant de ligne i_a (A)



(c) Courant de ligne i_a (A) et la tension de phase réduite e_a (V)



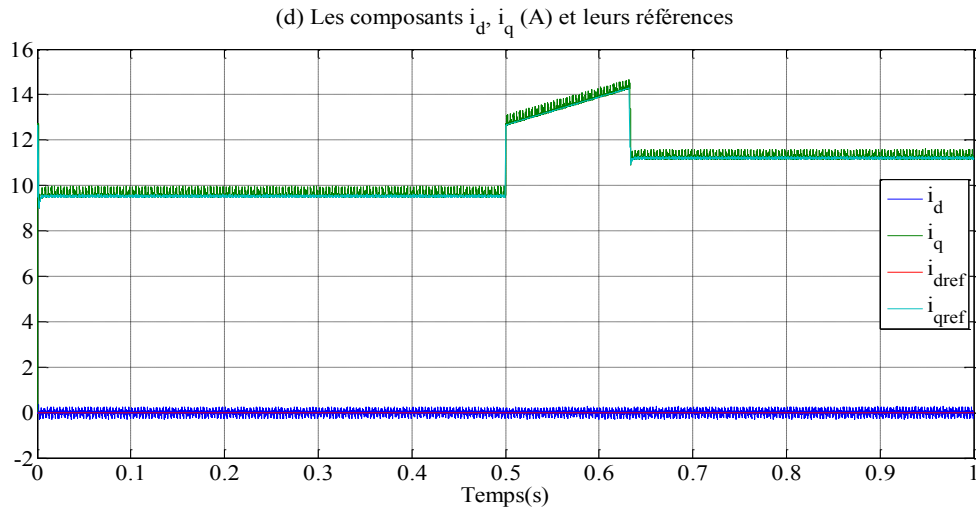
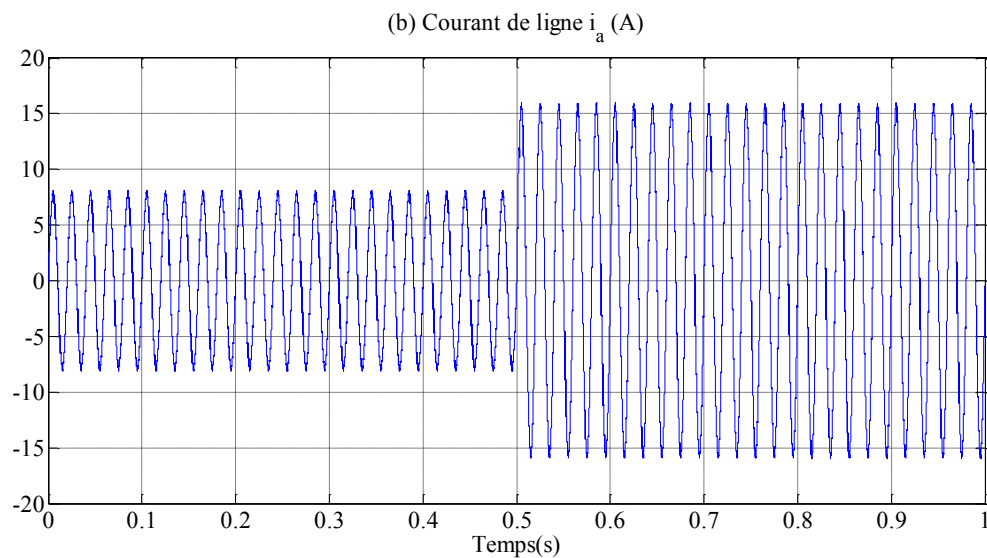
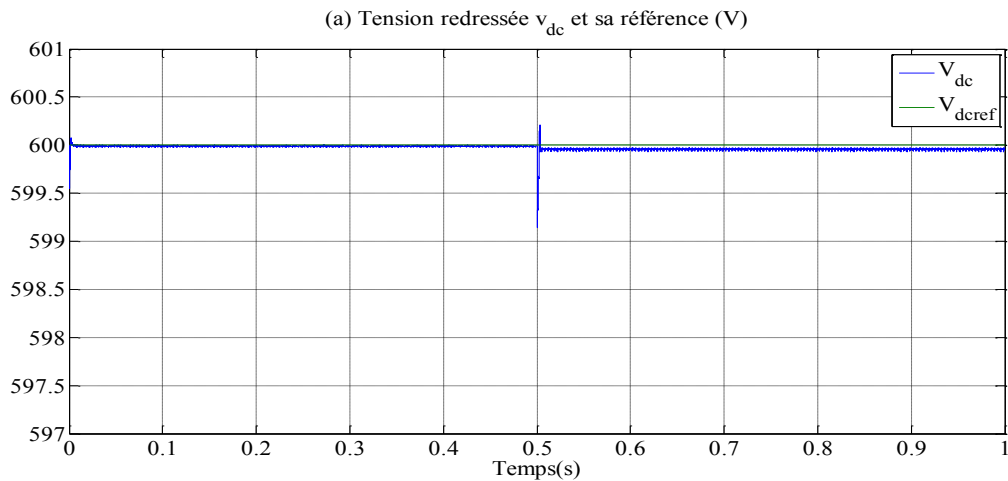


Figure (IV.11) : Performances du redresseur commandé par VFOC-mode glissant avec observateur par mode glissant du flux virtuel lors d'une variation de la tension de référence

La figure (IV.12) montre la réponse du redresseur lors d'une diminution de la résistance de charge de 100% à $t = 0.5s$.



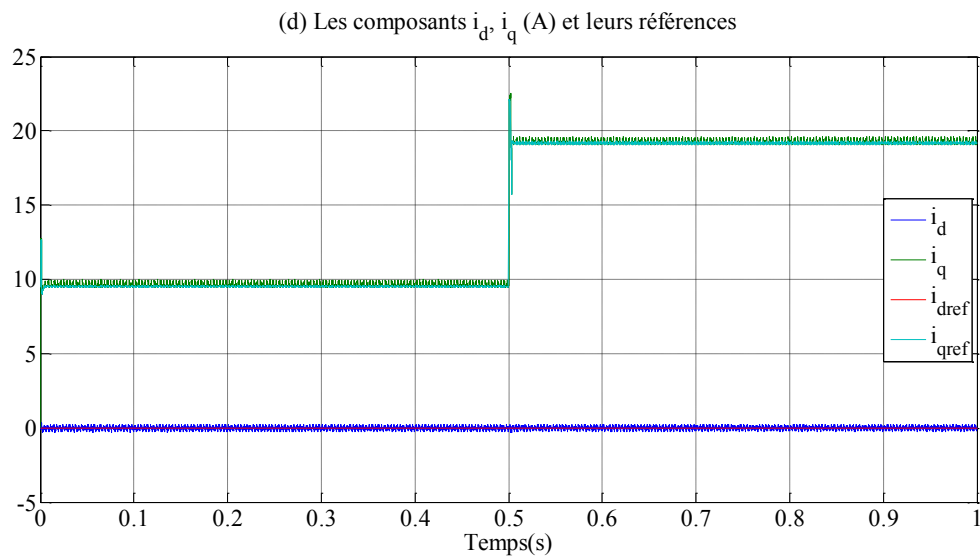
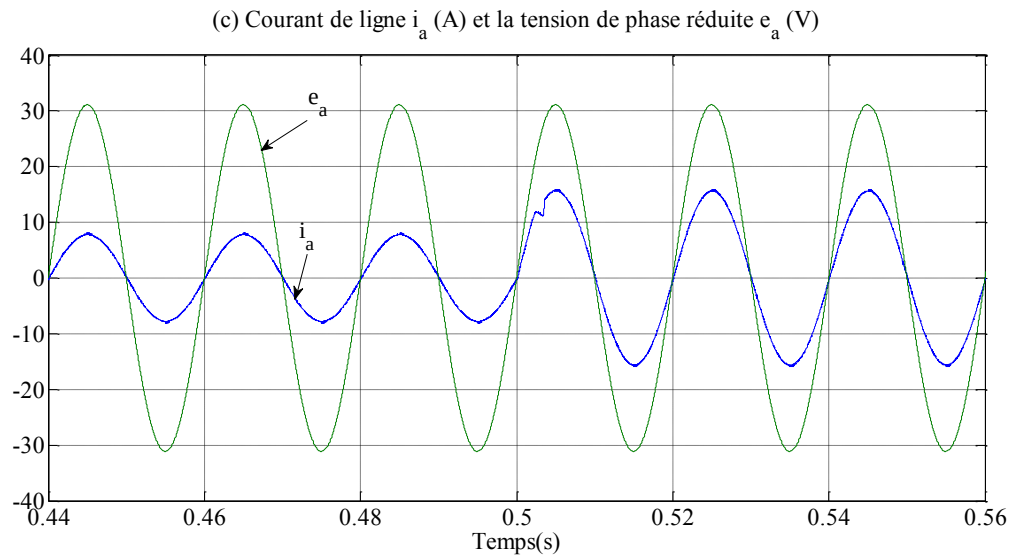


Figure (IV.12) : Test de robustesse vis-à-vis la variation de la résistance de charge

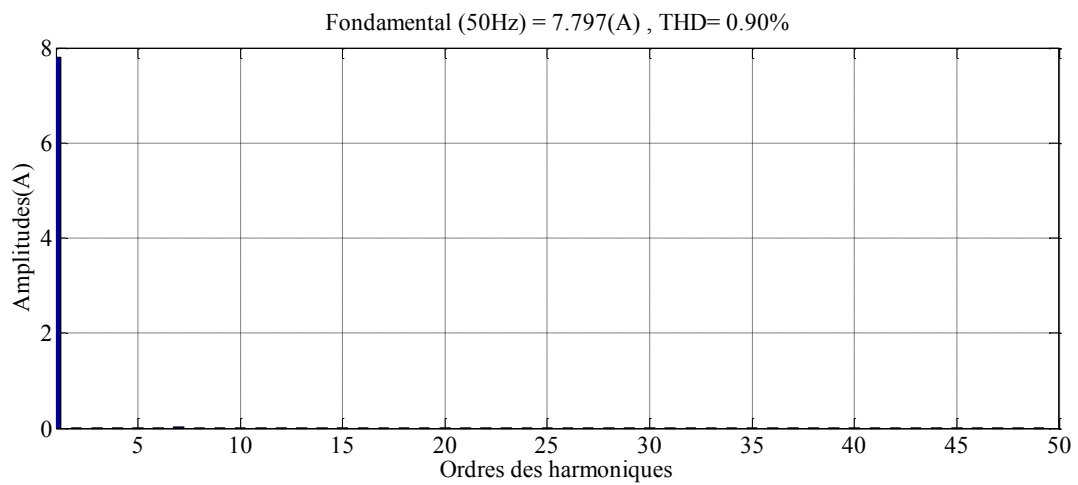


Figure (II.13) : Spectre harmonique du courant de ligne

IV.11.2. Comportement du redresseur alimenté par un réseau perturbé

La figure (IV.14) montre la réponse du redresseur commandé par VFOC-mode de glissement avec observateur par mode glissant du flux virtuel avec une référence de la tension de sortie fixée à $V_{dc\text{ ref}} = 600\text{ V}$.

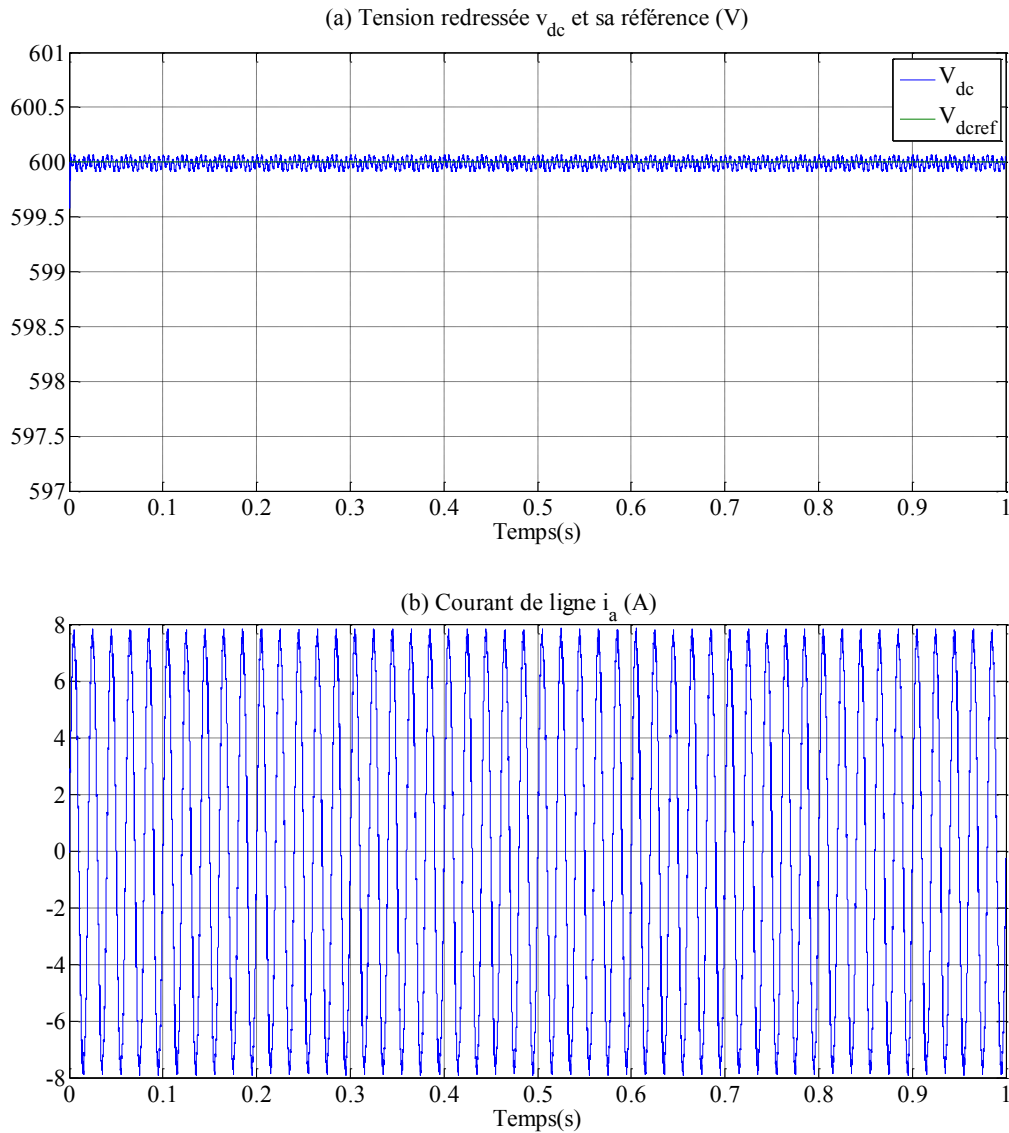


Figure (IV.14) : Performances du redresseur commandé par VFOC-mode de glissement avec observateur par mode glissant du flux virtuel et alimenté par un réseau perturbé

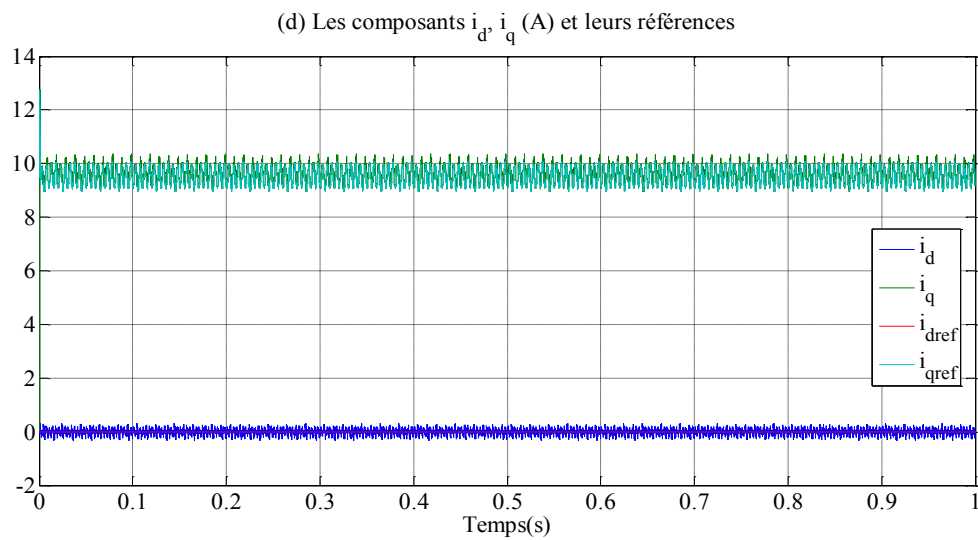
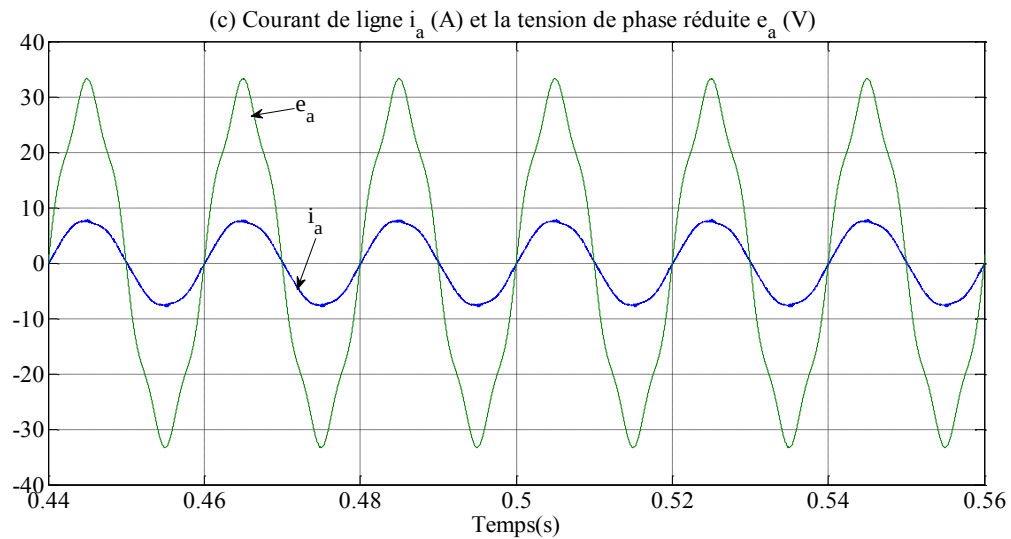


Figure (IV.14) : Performances du redresseur commandé par VFOC-mode de glissement avec observateur par mode glissant du flux virtuel et alimenté par un réseau perturbé

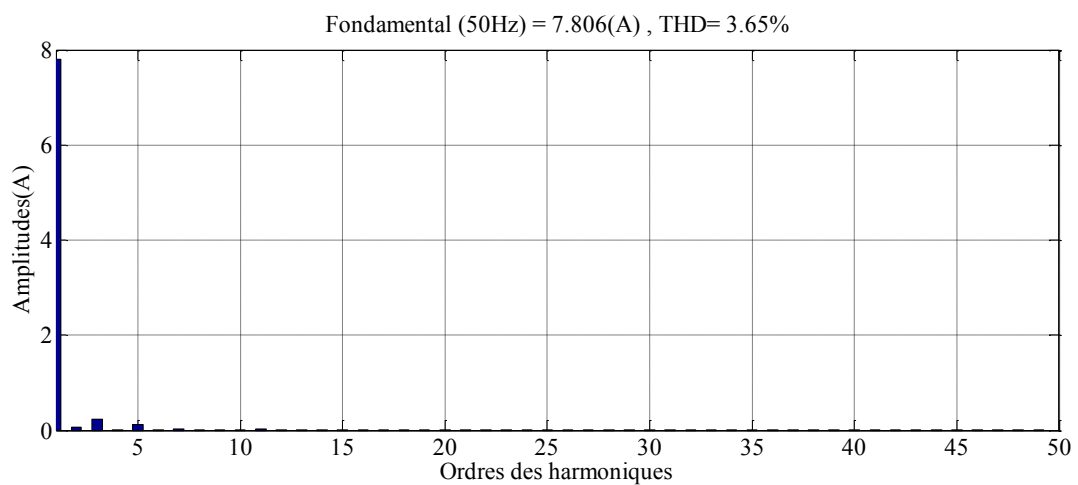


Figure (IV.15) : Spectre harmonique du courant de ligne fourni par un réseau perturbé

IV.12. Interprétations des résultats

IV.12.1. Comportement du redresseur alimenté par un réseau idéal

Les figures (IV.5) et (IV.11) montrent les résultats de simulation du redresseur PWM commandé par VOC-mode de glissement avec observateur de tension et VFOC-mode de glissement avec observateur de flux virtuel lors d'un changement de la référence de la tension de sortie. On remarque que la tension de sortie suit bien sa référence. Le courant du réseau est pratiquement sinusoïdal avec un THD = 0.99% pour le cas de la commande VOC-mode de glissement avec observateur de tension et 0.90% pour le cas de la commande VFOC-mode de glissement avec observateur de flux virtuel. En outre, le courant de ligne est maintenu en phase avec la tension correspondante. Nous remarquons également que les deux composantes du courant suivent leurs consignes, ceci prouve l'efficacité des régulateurs de courant utilisés.

Les figures (IV.6) et (IV.12) montrent les allures du courant de ligne et de la tension de sortie avec les commandes VOC-mode de glissement avec observateur de tension et VFOC-mode de glissement avec observateur de flux virtuel respectivement lors d'une réduction brusque de la charge de 100%. Le courant de ligne reste en phase avec la tension de ligne, ce qui prouve qu'il n'y a aucune consommation de la puissance réactive.

IV.12.2. Comportement du redresseur alimenté par un réseau perturbé

Les figures (IV.12) et (IV.21) montrent les résultats de simulation du redresseur PWM commandé par VOC-mode de glissement avec observateur de tension et VFOC-mode de glissement avec observateur de flux virtuel et alimenté par un réseau perturbé par injection de l'harmonique 5. Le taux de distorsion harmonique du courant du réseau est de THD = 7.78% pour la commande VOC-mode de glissement avec observateur de tension et de 3.65% pour la commande VFOC-mode de glissement avec observateur de flux virtuel. On constate bien que la commande VFOC-mode de glissement avec observateur de flux virtuel offre un THD inférieure à celui enregistré avec la commande VOC-mode de glissement avec observateur de tension du fait du comportement intégral de l'estimateur du flux.

IV.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un observateur par mode de glissement destiné à reconstruire les tensions ou les flux virtuels du réseau. L'idée est de construire le modèle en courant du réseau ce qui permet par la suite d'estimer les tensions de ligne et les flux virtuels.

Ces observateurs sont exploités dans la commande du redresseur triphasé associé aux commandes VOC-mode de glissement et VFOC-mode de glissement.

Les résultats de simulation montrent que les schémas de commande basés sur des observateurs de tension ou de flux virtuel améliorent le taux de distorsion harmonique par rapport à ceux basés sur des estimateurs de tension ou de flux virtuel.