

Commande d'un onduleur avec des approches neuromimétiques pour la compensation des courants harmoniques dans les réseaux électriques

Madjid Boudjedaimi*, Patrice Wira**, Djaffar Ould Abdeslam**, Said Djennoune*, Jean-Philippe Urban**

* Université Mouloud Mammeri, Laboratoire L2CSP, BP 17 RP, 15000 Tizi Ouzou, Algérie

** Université de Haute Alsace, Laboratoire MIPS, 4 rue des Frères Lumière, 68093 Mulhouse, France

Résumé – Cet article présente une stratégie complète d'identification et de commande neuronale d'un onduleur de tension triphasée utilisé pour le filtrage actif parallèle des courants harmoniques. Basée sur l'utilisation de techniques neuromimétiques, cette approche de compensation se fait en deux étapes. La première étape identifie les courants harmoniques avec la méthode des courants diphasés à l'aide des réseaux de neurones du type Adaline. La deuxième étape injecte les courants harmoniques dans le réseau électrique ; elle utilise une commande basée sur un régulateur PI neuronal. La structure proposée s'adapte automatiquement aux fluctuations des perturbations harmoniques et permet la compensation des courants harmoniques. Des comparaisons avec une méthode classique d'identification et d'une commande à hystérésis sont présentées. Des simulations démontrent l'efficacité et la robustesse de cette stratégie.

Mots-clés – harmonique, filtrage actif parallèle, onduleur, réseaux de neurones artificiels, commande adaptative.

I. INTRODUCTION

La prolifération de perturbations électriques est due à un nombre croissant de charges non linéaires présentent dans les lignes électriques (tels que les convertisseurs, les ordinateurs personnels, les appareils à tubes fluorescents, etc.). Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant. Les composantes harmoniques générées se propagent dans l'ensemble du réseau de distribution électrique sous la forme de courants qui peuvent sérieusement affecter d'autres appareils en allant parfois même jusqu'à les détériorer.

Depuis maintenant quelques années, les Filtres Actifs Parallèles (FAPs) se sont révélés être des techniques efficaces pour la compensation des composantes harmoniques [1]. Ces filtres cherchent à identifier les composantes harmoniques afin de les réinjecter efficacement dans le réseau électrique en opposition de phase. Ils sont également capables de corriger le facteur de puissance et de compenser l'éventuel déséquilibre d'un système triphasé. De plus, les FAPs peuvent être insérés aisément dans les installations existantes de distribution électrique sans nécessiter de grandes modifications. Reconnus pour leur facilité de mise en œuvre, pour leur robustesse et leur fiabilité, ils représentent aujourd'hui la technique la plus largement employée pour dépolluer les systèmes électriques.

L'introduction des techniques dites « intelligentes » dans les stratégies de commande est récente. Parmi elles, les Réseaux de

Neurones Artificiels (RNAs), appelés aussi réseaux neuromimétiques, constituent à ce jour une technique de traitement de données bien comprise et bien maîtrisée. De façon formelle, un RNA est une fonction mathématique associant à des entrées, des grandeurs de sortie à l'aide de paramètres ajustables appelés des poids. A partir d'un ensemble de données représentatives, il est possible d'ajuster les poids pour apprendre une fonction quelconque. Grâce à ce processus d'apprentissage, les RNAs sont des approximateurs universels parcimonieux capables d'estimer un modèle complexe avec une précision voulue. Ils réalisent à la fois des fonctionnalités d'identification, de contrôle ou de filtrage. Ils prolongent les techniques classiques de l'automatique non linéaire et peuvent conduire vers des solutions efficaces et robustes.

L'utilisation des RNAs se justifie en particulier pour tenir compte ou faire face à des changements de paramètres d'un système. En effet, de part leur apprentissage, les RNAs sont capables d'adapter leur poids de sorte à tenir compte de tous changements inopinés. Ils sont donc logiquement utilisés dans les systèmes électriques [2-3] et en particulier au sein d'une architecture de FAP [4].

Un système électrique est complexe dans le sens où il est constitué d'une multitude de sous-systèmes distribués sur plusieurs sites. Des charges non linéaires peuvent être connectées ou déconnectées à des lieux distincts à tout instant. Pour faire face à tous changements de paramètres, un FAP commandé sur une approche neuronale est proposé.

Un FAP peut se décomposer en deux parties principales : l'identification des courants harmoniques et la commande d'un onduleur permettant d'injecter les courants de compensation. Nos travaux portent sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques avec une approche neuronale préalablement introduite [5] et portent également sur la commande de l'onduleur à l'aide d'un régulateur PI neuronal.

A cet effet, la Section II récapitule brièvement le principe et l'architecture d'un FAP. Dans la Section III, la partie puissance est étudiée à travers la modélisation de l'onduleur et d'un filtre de sortie. La Section IV introduit la technique d'identification des courants harmoniques à l'aide des réseaux Adalines. Une commande par hystérésis pour le contrôle de l'onduleur est préalablement introduite dans la Section V. Dans cette même section, une commande basée sur un régulateur PI neuronal est également développée. La section VI montre les améliorations apportées par les approches neuromimétiques par rapport aux méthodes classiques dans le cadre de la compensation de composantes harmoniques. Ces

résultats sont obtenus par des études comparatives menées lors de diverses simulations. En plus d'une restitution efficace de la forme sinusoïdale du courant de la source, nous montrons que cette méthode peut être facilement employée pour une compensation sélective des harmoniques. Un bilan sur cette approche neuronale ainsi que sur ses possibilités est dressé dans la dernière section.

II. STRUCTURE GENERALE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE

La structure générale d'un FAP triphasé de type tension est présentée par la Fig. 1 où l'on distingue l'onduleur et le filtre de sortie de la partie puissance ainsi que les différents blocs de la partie contrôle-commande. La partie puissance est généralement constituée d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, d'un circuit de stockage d'énergie (souvent capacitif) et d'un filtre de sortie du premier ordre. La partie contrôle-commande est composée d'une première étape dont le rôle est l'identification des harmoniques et d'une seconde étape qui réalise la régulation de la tension continue. Une troisième et dernière étape génère la commande de l'onduleur.

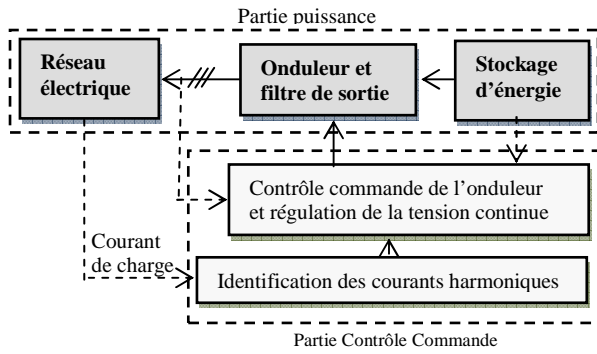


Fig. 1. Structure générale du filtre actif parallèle.

Cette étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique (THD) est bien adapté pour qualifier le degré de pollution harmonique sur le réseau électrique.

III. ETUDE DE LA PARTIE PUISSANCE : MODELISATION DE L'ONDULEUR ET DU FILTRE DE SORTIE

L'onduleur utilisé par le FAP est un onduleur triphasé à structure de tension. Ce dernier est représenté par la Fig. 2 et se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. Dans la pratique, chaque interrupteur est un transistor IGBT et d'une diode montée en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) qui permet de connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

Dans l'hypothèse d'avoir un système équilibré, les tensions du côté alternatif sont définies comme :

$$v_{si} = V_m \sin\left(\omega t - (i-1)\frac{2\pi}{3}\right) \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

En appliquant la loi de Kirchhoff côté alternatif, on obtient :

$$L_{fi} \frac{di_{inj i}}{dt} = -v_{si} - R_{fi} i_{inj i} + v_{fi} \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

avec $v_{si} = [v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}]^T$, $v_{fi} = [v_{f1}, v_{f2}, v_{f3}]^T$ qui représentent les tensions par rapport au point neutre n de la Fig. 2, et $i_{inj i} = [i_{inj 1}, i_{inj 2}, i_{inj 3}]^T$ qui sont les courants injectés par l'onduleur dans le réseau triphasé.

Le lien entre le côté alternatif et le côté continu de l'alternateur se fait à travers les interrupteurs u_k et \bar{u}_k . Ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$u_k = \begin{cases} +1, & \bar{u}_k = -1 \\ -1, & \bar{u}_k = +1 \end{cases} \quad \text{pour } k = 1, 2, 3 \quad (3)$$

L'expression reliant les tensions v_{fi} à la tension continue V_{dc}

en fonction de la position des interrupteurs (u_1, u_2, u_3) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

La tension continue dans l'onduleur peut alors être calculée à partir des courants injectés par le FAP et en fonction de la commutation des interrupteurs comme suit [6] :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} (u_1 i_{inj 1} + u_2 i_{inj 2} + u_3 i_{inj 3}) \quad (5)$$

La qualité de la compensation des harmoniques dépend fortement des performances de la méthode d'identification choisie. En effet, le système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer des corrections suffisantes si les harmoniques parasites sont mal identifiées. De nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature. Nous avons choisi celle proposée dans [7] car elle est également basée sur des Adalines. Ce choix permet d'obtenir une structure de calcul homogène en vue d'une éventuelle implémentation sur une cible matérielle. De plus, cette méthode a été validée expérimentalement et a démontré une très bonne robustesse.

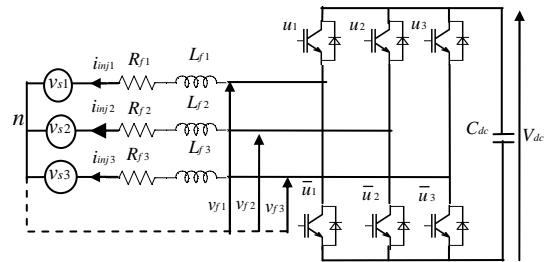


Fig. 2. Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

IV. IDENTIFICATION DES HARMONIQUES AVEC LA METHODE DES COURANTS DIPHASES

A. Décomposition des courants

La méthode des courants diphasés [7] travaille dans l'espace des courants DQ. Elle nécessite de ce fait moins de calculs tout en étant plus précise et plus robuste que d'autres méthodes.

Considérons les courants pollués sur les trois phases donnés par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} = I_1 \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \alpha) \\ \cos(\omega t - \alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t - \alpha + 2\pi/3) \end{bmatrix} + \sum_{n=2 \dots N} I_n \begin{bmatrix} \cos(n\omega t - \alpha) \\ \cos(n\omega t - \alpha - 2\pi/3) \\ \cos(n\omega t - \alpha + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

où la première partie représente les courants fondamentaux et la seconde représente la somme des distorsions harmoniques.

Ces courants peuvent s'écrire dans l'espace $\alpha\beta$ à l'aide de la transformée de Concordia exprimée par la matrice T_{32} :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^T \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \alpha) \\ \sin(\omega t - \alpha) \end{bmatrix} + \sum_{n=2 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \cos(n\omega t - \alpha_n) \\ \sin(n\omega t - \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

En appliquant une transformation de Park avec un angle de $-\omega t$, les courants s'écrivent dans l'espace DQ comme indiqués ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = P(-\omega t) \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ -\sin(\alpha) \end{bmatrix} + \sum_{n=2 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \cos((n-1)\omega t - \alpha_n) \\ \sin((n-1)\omega t - \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

avec

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_D \\ \bar{i}_Q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ -\sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Et

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_D \\ \tilde{i}_Q \end{bmatrix} = \sum_{n=2 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \cos((n-1)\omega t - \alpha_n) \\ \sin((n-1)\omega t - \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

On peut voir que les composantes continues \bar{i}_D et \bar{i}_Q de (9) sont issues de la fréquence fondamentale. D'un autre côté, les composantes alternatives \tilde{i}_D et \tilde{i}_Q de (10) proviennent quand à elles des distorsions harmoniques. Ainsi, nous pouvons utiliser deux filtres passe-bas afin de séparer les composantes continues des composantes alternatives. Pour retrouver les courants harmoniques i_{mj} dans le repère triphasé, nous effectuons successivement les transformations T_{32} et $P(\omega t)$ sur les courants de l'équation (10).

B. Identification des harmoniques avec les Adalines

Depuis une dizaine d'année, de nombreuses techniques basées sur des réseaux neuromimétiques et sur l'Adaline en particulier ont été développées pour identifier et filtrer les harmoniques dans les systèmes électriques.

Le réseau de neurones appelé Adaline (ADAPtive LINear Element) relie un vecteur d'entrée à une seule sortie à travers un unique poids adaptatif. Le neurone effectue ce lien à travers une fonction d'activation linéaire. Avec une règle d'apprentissage du type LMS (Least-Mean-Square), l'apprentissage est réalisé par itération. Dans ce travail nous utilisons cette règle dont la convergence a été démontrée [8].

Dans notre application, deux Adalines sont nécessaires pour extraire les courants harmoniques dans le repère DQ. La Fig. 3 montre la topologie de l'identification des courants harmoniques diphasés. Ainsi, les deux courants de l'équation (8) peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_D^T X_D(t) \\ W_Q^T X_Q(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Pour un courant fondamental pollué par des harmoniques d'ordre $n = 1, 5, 7, 11, 13 \dots N$, on obtient :

$$\begin{cases} W_D^T = \sqrt{\frac{3}{2}} [I_1 \cos \alpha_1 & I_5 \cos \alpha_5 & I_5 \sin \alpha_5 & \dots & I_n \sin \alpha_n] \\ X_D(t) = [1 & \cos 4\omega t & \sin 4\omega t & \dots & \sin(n-1)\omega t] \\ W_Q^T = \sqrt{\frac{3}{2}} [-I_1 \sin \alpha_1 & I_5 \cos \alpha_5 & -I_5 \sin \alpha_5 & \dots & -I_n \sin \alpha_n] \\ X_Q(t) = [1 & \sin 4\omega t & \cos 4\omega t & \dots & \cos(n-1)\omega t] \end{cases} \quad (12)$$

Les vecteurs $X_D(t)$ et $X_Q(t)$ constituent les entrées des deux Adalines. Les vecteurs W_D^T et W_Q^T représentent les poids des Adalines estimés par le processus d'apprentissage. Le poids $W_0(k)$ du premier Adaline estime \bar{i}_D et le poids $W_0(k)$ du second Adaline estime \bar{i}_Q . Les composantes alternatives des courants diphasés sont données par : $\tilde{i}_D = i_D - \bar{i}_D$ et $\tilde{i}_Q = i_Q - \bar{i}_Q$.

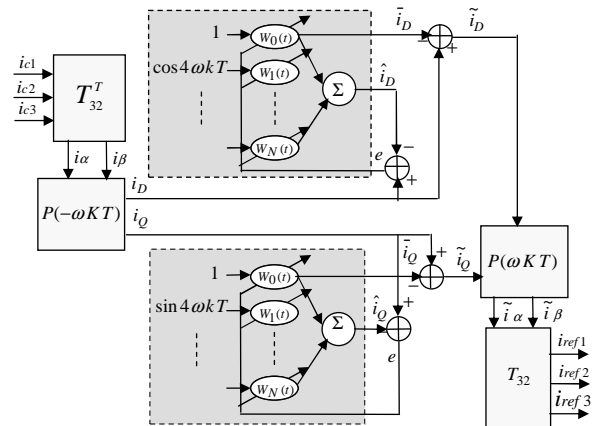


Fig. 3. Structure d'identification par la méthode des courants diphasés.

V. LA COMMANDE DE L'ONDULEUR

La structure du système de commande de l'onduleur peut être séparée en deux sous systèmes ayant des dynamiques différentes : l'une dite rapide qui est liée aux courants, et une autre dite lente qui est associée à la tension continue. On peut de ce fait, synthétiser deux régulateurs, un pour la boucle interne des courants et un autre pour la boucle externe de la tension continue. D'autre part, il est bien connu que la performance de la boucle des courants joue un rôle essentiel dans la performance globale du système ; c'est pourquoi une commande ayant une réponse rapide et un bon comportement en état stationnaire s'avère nécessaire. Pour le réglage de la tension continue, l'utilisation de commandes classiques, en particulier du type proportionnel-intégral (PI), semble être suffisante pour obtenir des performances acceptables. C'est pour cette raison que ce travail est plutôt consacré à l'étude des différentes lois de commande pour la boucle interne des courants.

L'objectif principal consiste à réinjecter les courants de référence dans le réseau électrique. Cette opération se fait à travers des ordres de commande appliqués aux divers interrupteurs. Différentes techniques de commande sont recensées dans la littérature. On peut citer la commande par hystérésis et la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion). La commande par hystérésis est basée sur le principe du réglage par mode glissant qui se résume pour un système du premier ordre à simple relais. Elle est parfaitement adaptée aux organes de commande ayant une action à deux positions comme c'est le cas pour l'onduleur.

A. Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, illustrée par la Fig. 4, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, les fréquences situées dans le haut de cette bande se maîtrisent difficilement à cause des fréquences de commutation.

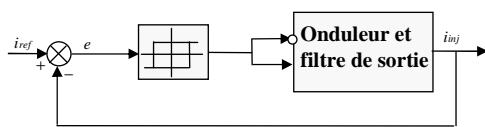


Fig. 4. Schéma de commande par hystérésis.

Afin de parfaitement maîtriser les fréquences de commutation et de leur répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée. Il s'agit de la commande MLI qui cherche à rendre la fréquence de commutation constante. Elle requiert pour cela un régulateur, et des actions proportionnelle, intégrale et dérivée peuvent être utilisées (PID).

Les capacités qu'ont les réseaux de neurones à estimer une fonction non linéaire quelconque sont très intéressantes du point de

vue de la commande. Les réseaux de neurones représentent une solution viable pour l'élaboration d'une commande d'un tel système dans la mesure où un neurocontrôleur constitue un contrôleur adaptatif.

B. Commande avec un régulateur PI neuronal

La littérature scientifique fait état d'un grand nombre de stratégies de commande à base des techniques neuromimétiques. Un exposé détaillé sur différents schémas de commande à base de réseaux de neurones peut être consulté dans [9]. La commande d'un onduleur monophasé par un réseau de neurones de type Adaline est réalisée dans [10]. Un réseau de neurones multicouche avec deux couches cachées est utilisé pour apprendre une commande par hystérésis dans [11-12]. Dans des travaux récents [5], quatre schémas d'apprentissage sont utilisés pour la commande d'un onduleur triphasé.

En exploitant la faculté d'apprentissage des réseaux de neurones, nous avons élaboré un système permettant d'estimer les deux paramètres d'un régulateur PI. Le schéma de principe permettant d'estimer le gain proportionnel et intégral du PI avec un Adaline est détaillé par la Fig. 5. Le vecteur d'entrée de l'Adaline possède deux composantes : l'erreur et son intégral. Le poids $W_0(k)$ pondérant l'erreur est associé au facteur P (Proportionnel) et le poids $W_1(k)$ pondérant l'intégral de l'erreur est associé au facteur I (intégral). L'erreur d'apprentissage sera $e = i_{ref} - i_{inj}$ et l'algorithme de mise à jour des poids est la règle LMS.

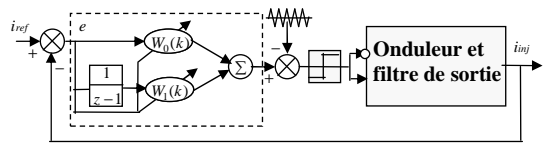


Fig. 5. Schéma de commande avec un régulateur PI neuronal.

Le but de cette approche est de concevoir un régulateur PI adaptatif tout en exploitant la simplicité de réglage du réseau Adaline. Lorsque le signal injecté arrive à suivre la référence selon les critères fixés par l'utilisateur, alors l'apprentissage peut être arrêté. L'Adaline joue ensuite le rôle d'un PI non adaptatif. Si des variations importantes surviennent au niveau du système à commander, l'apprentissage peut reprendre.

VI. RESULTATS DE SIMULATION

Les modèles et l'ensemble des simulations sont réalisés dans l'environnement Matlab/Simulink. L'objectif est de valider et de montrer l'efficacité de l'utilisation des réseaux de neurones Adalines pour l'identification et la commande dans le filtrage actif parallèle.

Les valeurs des éléments caractérisant le système électrique sont les suivantes : $V_m = 230$ V, $f = 50$ Hz, $L_f = 0.5$ mH, $R_f = 8$ mΩ, $C_{dc} = 4.4$ mF, $V_{dc} = 840$ V, avec une fréquence de commutation $f_c = 12.5$ kHz. Afin de vérifier les résultats de simulation et la

robustesse des stratégies proposées, un courant fondamental de fréquence 50 Hz a été généré et des harmoniques d'ordre 5, 7, 11 et 13 lui ont été additionnées. De plus, l'amplitude du courant pollué i_c est modifiée pour passer de 180 à 230 A à l'instant $t = 0.16 s$.

A. Compensation classique

Les approches classiques proposées dans ces comparatifs servent de référence pour l'évaluation des performances des approches neuronales. La plus simple est constituée d'un filtre passe-bas pour l'identification des courants harmoniques avec la technique des courants diphasés et d'une commande de l'onduleur de type hystérésis. Cette technique vaut plus pour sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre. Elle présente quelques désavantages qui limitent son usage dans des applications demandant une haute performance,

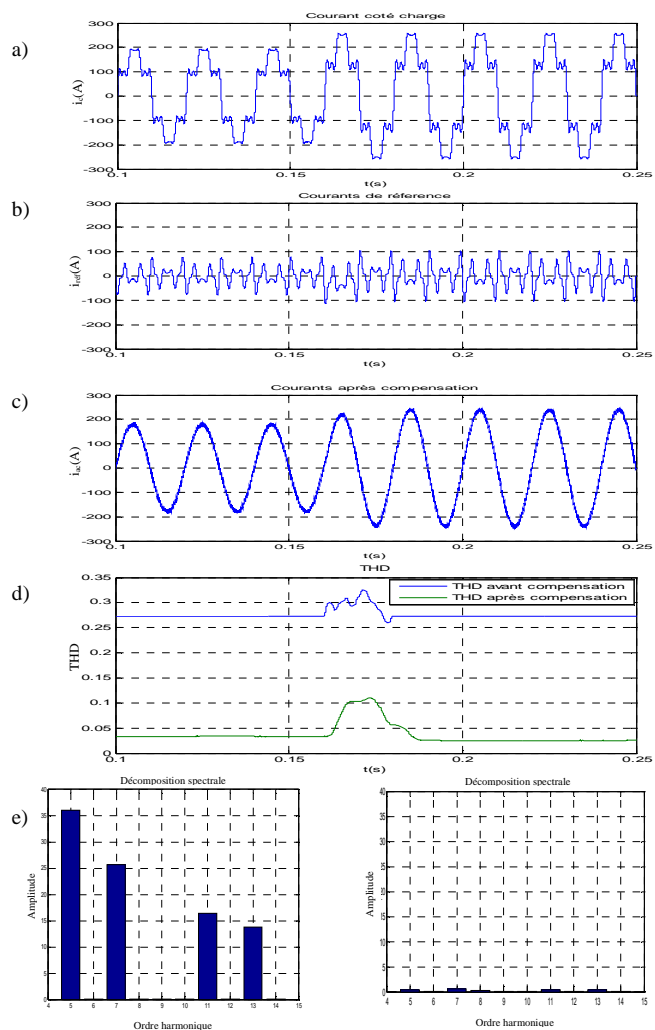


Fig. 6. Performance de la compensation classique pour une variation en ligne de i_c , a) le courant pollué par des harmoniques 5, 7, 11 et 13, b) le courant harmonique identifié, c) le courant après compensation, d) le THD avant et après compensation e) la décomposition spectrale des courants avant et après compensation.

comme par exemple son incapacité à fixer la fréquence de commutation. La Fig. 6 montre les performances de cette approche grâce aux courants de la source avant compensation et après compensation. Le THD avant compensation est de 27.31%, il est ramené à 3.38% après compensation.

B. Compensation neuronale

L'approche neuronale utilise des Adalines pour l'identification des courants harmoniques avec la technique des courants diphasés et un bloc de commande de l'onduleur. La commande de l'onduleur est effectuée par un régulateur PI neuronal. La Fig. 7 donne un aperçu du courant source avant et après compensation. Le signal compensé issu de cette approche purement neuronale est proche d'une sinusoïde. De plus, l'apprentissage en ligne des réseaux de neurones permet une adaptation de la compensation aux fluctuations des

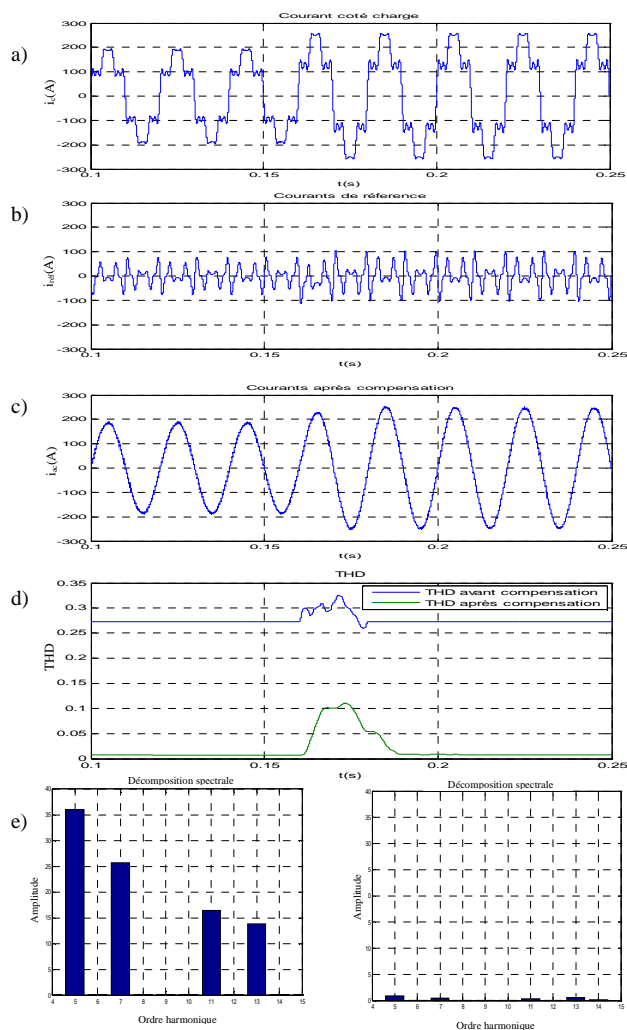


Fig. 7. Performance de la compensation neuronale, a) le courant pollué, b) le courant harmonique identifié, c) le courant après compensation, d) le THD avant et après compensation, e) la décomposition spectrale des courants avant et après compensation.

perturbations. Le THD mesuré est de 1.4% grâce à cette approche au lieu de 3.38% avec l'approche classique. On peut constater que la compensation par la technique neuronale a nettement amélioré la qualité du courant.

Les bonnes performances de la compensation par la technique neuronale sont confirmées par la Fig. 7 (e) qui illustre la décomposition spectrale du courant avant et après compensation pour les harmoniques d'ordre 5, 7, 11, 13. Les amplitudes de ces harmoniques sont fortement atténuées grâce à l'approche neuronale.

C. Régulation de la tension continue

Afin de rendre possible l'injection d'un courant de référence dans chacune des phases, la tension aux bornes du condensateur C_{dc} doit être constante et fixée à une valeur prédéterminée afin d'assurer le rôle d'une source de tension continue. La technique que nous avons utilisée pour contrôler la tension aux bornes de C_{dc} est un contrôleur PI classique. La sortie du régulateur de tension s'ajoute à la composante active harmonique et donne lieu à un courant fondamental actif supplémentaire corrigeant la tension continue V_{dc} . Le correcteur a été optimisé pour obtenir une réponse correcte à un échelon de référence $V_{dc\ ref} = 840\text{ V}$. La Fig. 8 montre la consigne et la sortie pour une régulation efficace de la tension continue.

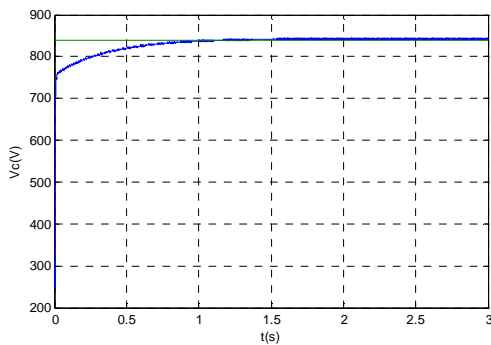


Fig. 8. Réponse à un échelon de la tension continue.

VII. CONCLUSIONS

Dans cette étude, une stratégie complète d'identification et de commande d'un onduleur a été introduite. Cette approche est basée sur des techniques intelligentes neuromimétiques qui surpassent les limites des techniques classiques. Notre étude a porté sur un système complet incluant toutes les fonctionnalités d'un FAP, que nous avons scindé en deux parties, en vue d'une approche neuromimétique. Ces deux parties sont l'identification des courants de compensation d'une part, et la génération des signaux de commande de l'onduleur d'autre part.

Une méthode neuronale d'identification et de compensation des distorsions harmoniques a été introduite. Cette méthode, appelée méthode des courants diphasés est basée sur des Adalines, est simple et peut facilement être mise en œuvre. Elle traduit les courants

harmoniques dans l'espace DQ afin de séparer linéairement chaque composante fréquentielle.

La commande de l'onduleur est réalisée par un régulateur PI neuronal capable de s'adapter aux variations de la charge. Ce schéma de commande reprend le principe d'un régulateur PI et emploie un réseau Adaline pour ajuster les paramètres proportionnel et intégral.

Des comparatifs réalisés en simulation démontrent que l'approche « tout neuromimétique » conduit à des résultats qui dépassent ceux d'une approche dite classique.

REFERENCES

- [1] H. Akagi, "Trends in Active Power Line," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 263-268, 1994.
- [2] B. K. Bose, "Neural Network Applications in Power Electronics and Motor Drives - An Introduction and Perspective," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 14-33, 2007.
- [3] R. C. Bansal, T. S. Bhatti, and D. P. Kothari, "Artificial Intelligence Techniques for Reactive Power/Voltage Control in Power Systems: A Review," International Journal of Power and Energy Systems, vol. 23, no. 2, pp. 81-89, 2003.
- [4] D. Ould Abdeslam, P. Wira, J. Mercklé, D. Flieller, and Y.-A. Chapuis, "A unified artificial neural network architecture for active power filters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 61-76, 2007.
- [5] D. Ould Abdeslam, P. Wira, J. Mercklé, and Y.-A. Chapuis, "A Neural Approach for the Control of an Active Power Filter," 5th International Power Electronics Conference, Niigata, Japan, 2005.
- [6] A. S. Toledo, "Commande Directe et Observation des Convertisseurs de Puissance : Application à l'Onduleur de Tension Triphasé," Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, 2000.
- [7] D. Ould Abdeslam, P. Wira, D. Flieller, and J. Mercklé, "Power harmonic identification and compensation with an artificial neural network method," International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, Canada, pp. 1732-1737, 2006.
- [8] B. Widrow and E. Walach, Adaptive Inverse Control. Upper Saddle River: Prentice Hall Press, 1996.
- [9] S. Omatu, M. Khalid et R. Yusof, "Neuro-control and its Applications Advances in Industrial Control," Springer-Verlag, London, 1996.
- [10] H. Deng, R. Orugant et D. Srinivasan, "A neural network-based adaptive controller for single phase inverters in critical applications," IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore, 2003.
- [11] J. R. Vasquez, P. Salmeron, J. Prieto et A. Pérez, "A practical implementation of a three-phase active power line conditioner with anns technology," 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Sevilla, Spain, pp. 739-744, 2002.
- [12] J. Vazquez et P. Salmeron, "Active power filter control sing neural network technologies," IEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. 150, pp. 139- 145, 2003.