

Etude de l'élimination des déséquilibres et harmoniques dans un réseau de distribution basse tension par un filtre actif parallèle à quatre bras contrôlés par un régulateur neuro-flou: Cas du réseau basse tension du quartier MAMPALA

[Study of the elimination of unbalances and harmonics in a low voltage distribution network by a four-arm parallel active filter controlled by a neuro-fuzzy regulator: Case of the low voltage network in the MAMPALA district]

KYONI NKULU Idriss, NTAMBWE SAPU Aaron, and ZALI MUNUNGA Franck

Université de Lubumbashi, Route Kasapa, 1825 Lubumbashi, RD Congo

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The imbalances experienced by low voltage distribution networks following the individualization of energy consumption among domestic subscribers as well as the presence of non-linear loads in the network, reduce the quality of electrical energy and are accompanied by consequences which can on the one hand reduce the lifespan of certain equipment and on the other hand, lead to a resizing of equipment and cables in the network.

However, the objective pursued in this work was to carry out a study that could eliminate imbalances and reduce the rates of harmonic distortions in a low voltage network.

Indeed, the processed data were obtained following measurements carried out at the secondary level of transformer number 13 of 160kVA of the distribution network of the Gécamines city (MAMPALA district). These different measurements were carried out over a period of one week for a sampling time of 20 min using an MS2205 three-phase digital clamp multimeter.

Analysis of different data has proven that this network is out of balance with imbalance rates of up to 26%. The presence of non-linear loads in this network generates harmonic currents with harmonic distortion rates of up to 13.8 or 14% which leads to the presence of distorting power in the network. The latter reached a peak of around 15kVAD.

Different techniques for decontaminating low voltage networks are possible, within the framework of this thesis we have opted for the modern depollution technique, that is to say active filtering. We used a four-arm parallel active filter. The reference currents were identified using the synchronous reference method, the DC bus voltage was controlled by a neuro-fuzzy regulator and the filter was controlled by modulated hysteresis.

The results obtained after simulation on Matlab-Simulink proved that connecting the four-arm parallel active filter to the low voltage network eliminated the imbalance and reduced the current harmonic distortion rate from 13.8 to 1.59%.

KEYWORDS: imbalances, nonlinear loads, four-arm parallel active filter, synchronous frame of reference, neuro-fuzzy, modulated hysteresis.

RESUME: Les déséquilibres que connaissent les réseaux de distribution basse tension suite à l'individualisation de la consommation de l'énergie chez les abonnés domestiques ainsi que la présence des charges non linéaires dans le réseau, réduisent la qualité de l'énergie électrique et sont accompagnés des conséquences qui peuvent d'une part réduire la durée de vie des certains équipements et d'autre part, conduire à un redimensionnement des équipements et des câbles dans le réseau. Cependant, l'objectif poursuivi dans ce travail a été de faire une étude pouvant éliminer les déséquilibres et réduire les taux de distorsions en harmoniques dans un réseau basse tension.

En effet, les données traitées ont été obtenues suite aux mesures effectuées au secondaire du transformateur numéro 13 de 160kVA du réseau de distribution de la cité Gécamines (quartier MAMPALA). Ces différentes mesures ont été réalisées sur une

période d'une semaine pour un temps d'échantillonnage de 20min au moyen d'un multimètre numérique MS2205 à pince triphasé.

L'analyse de différentes données a prouvé que ce réseau est en déséquilibre avec des taux de déséquilibre allant jusqu'à 26%. La présence des charges non linéaires dans ce réseau engendre des courants harmoniques avec des taux de distorsion en harmoniques allant jusqu'à 13.8 soit 14% ce qui conduit à la présence d'une puissance déformante dans le réseau. Cette dernière a atteint un pic d'environ 15kVAD.

Différentes techniques de dépollution des réseaux basse tension sont possibles, dans le cadre de ce mémoire nous avons opté pour la technique de dépollution moderne c'est-à-dire le filtrage actif. Nous avons utilisé un filtre actif parallèle à quatre bras. L'identification des courants de références s'est faite par la méthode de référentiel synchrone, le contrôle de la tension du bus continu s'est fait par un régulateur neuro-flou et la commande du filtre par hystérésis modulée.

Les résultats obtenus après simulation sur Matlab-Simulink, ont prouvé que, le branchement du filtre actif parallèle à quatre bras sur le réseau basse tension a éliminé le déséquilibre et a réduit le taux de distorsion en harmonique de courant de 13.8 à 1.59%.

MOTS-CLEFS: déséquilibres, charges non linéaires, filtre actif parallèle à quatre bras, référentiel synchrone, neuro-floue, hystérésis modulée.

1 INTRODUCTION

La plupart des équipements domestiques et industriels fonctionnent avec de l'énergie électrique. Ces derniers ont besoin d'une énergie de bonne qualité pour bien fonctionner pendant un certain nombre d'années, tel que prévu par le concepteur. Cette énergie parvient aux abonnés grâce au réseau électrique.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons uniquement à la qualité de l'énergie électrique dans un réseau de distribution basse tension. Ce dernier permet de connecter les abonnés domestiques sur le réseau, pour l'alimentation de leurs charges habituellement en triphasé ou en monophasé.

Les déséquilibres et les distorsions en harmoniques détruisent la qualité de l'énergie électrique. Cette énergie est principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, elle permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique.

L'objectif de ce travail, va consister à faire une étude qui permettra d'éliminer les déséquilibres au secondaire d'un transformateur MT/BT ainsi que de limiter les harmoniques en temps réel en utilisant un convertisseur statique.

2 ANALYSE DU RÉSEAU BT DU QUARTIER MAMPALA

Le choix du réseau de distribution est porté sur le quartier MAMPALA de la cité Gécamines Lubumbashi. Ce quartier est alimenté par le transformateur abaisseur MT/BT numéro 13 du réseau de distribution de la Gécamines. Ce transformateur (figure1) est situé au croisement des avenues chute LOFOYI et barrage INGA. La réalisation des mesures s'est faite pendant une semaine soit du 20 au 26 Septembre 2021. Les prélèvements journaliers (figure 2) ont été faits pendant 12h et 30min soit de 6h50 à 19h30 chaque fois après 20 minutes, ce qui nous a permis de réaliser au moins 39 séries de mesures par jour et un total de 373 séries de mesures pour toute une semaine.

Les mesures ont été réalisées au moyen d'un multimètre numérique MS2205 à pince triphasé (Figure 2). C'est un appareil portable testeur de puissance harmonique intelligent, avec deux fonctions de test de courant numérique et de test de puissance.



Fig. 1. Transformateur N°13 de la cité Gécamines



Fig. 2. Multimètre MS2205 connecté au sectionneur jeu de barres

En effet, durant toute la semaine, le taux de déséquilibre en tension Voltage unbalance Factor (VUF) ainsi que le taux de distorsion en harmonique de tension étant négligeables soit $VUF \leq 0.9\%$ et $THD_u \leq 2\%$, les résultats présentés ne concernent que les ondes de courant qui ont donné des taux tels que le Current Unbalance Factor (CUF) et THD_i considérables.

2.1 ANALYSE DU DÉSÉQUILIBRE EN COURANT

Avant de faire une analyse sur le déséquilibre en courant, analysons d'abord le taux de charge ainsi que la puissance active consommée :

- Les mesures du courant de la charge dans les trois phases ont montré que la troisième phase est la plus chargée du réseau. Les pics de courants sont observés dans la matinée entre 7 et 9 heure, autour de midi entre 11 et 13heure. La charge est faible autour de 16h puis augmente dans la soirée aux environs de 17h. La relation (1) détermine le taux de charge du transformateur en pourcentage, par le rapport entre le courant mesuré dans le réseau et le courant nominal du transformateur :

$$\tau = \frac{I_{mes}}{I_{nom}} \times 100 \quad (1)$$

Avec $I_{nom} = 255A$.

Cependant, la figure 3 illustre l'évolution du taux de charge déterminé par rapport à la phase la plus chargée (troisième). Le taux max enregistré en semaine est de 118% et ce dernier est inférieur à 120%, ce qui justifie que le transformateur supporte une charge admissible et n'est pas en surcharge.

- Les mesures de la puissance active ont montré que la charge du transformateur évolue au cours des journées, les grandes consommations sont enregistrées dans la matinée et dans la soirée. Les courbes de puissance superposées à la figure 4 ont été obtenues par la sommation des puissances mesurées dans chaque phase. La puissance max consommée au cours de la semaine est de 151.48KW (Dimanche 6h50) et la puissance min de 92.23KW (Dimanche 16h 30).

➤ L'analyse du déséquilibre en courant se fait sur base de la détermination du taux de déséquilibre. La relation (2), nous permet de déterminer le taux de déséquilibre en courant CUF_i , par le rapport entre la composante inverse et la composante directe. Ces composantes sont obtenues à l'aide de la transformation de Fortescue.

$$CUF_i = \frac{I_i}{I_d} \quad (2)$$

Cependant, le taux de déséquilibre en courant ne doit pas dépasser 10% sur 95% des mesures prélevées en semaine [1]. La figure 5 illustre le profil du taux de déséquilibre en semaine. Le pic du CUF_i enregistré au cours de la semaine est de 26% (samedi à 11h30). Ainsi, en observant la figure 5 le CUF_i est supérieur à 10% sur une longue période au cours de différentes journées de la semaine. Ce qui prouve que la norme sur le déséquilibre en courant n'est pas vérifiée et que le réseau de distribution est en déséquilibre.

Le réseau est en déséquilibre, cela justifie la présence de la composante homopolaire et donc d'un courant permanent dans le neutre. La figure 6 montre que le plus grand courant mesuré dans le neutre est de 145.7A (Dimanche 9h 30).

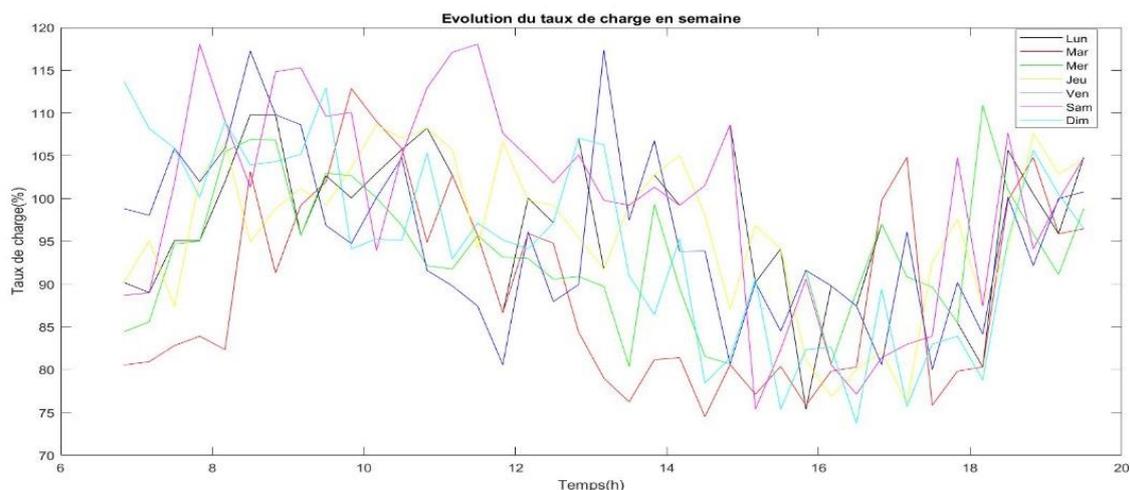


Fig. 3. Evolution du taux de charge

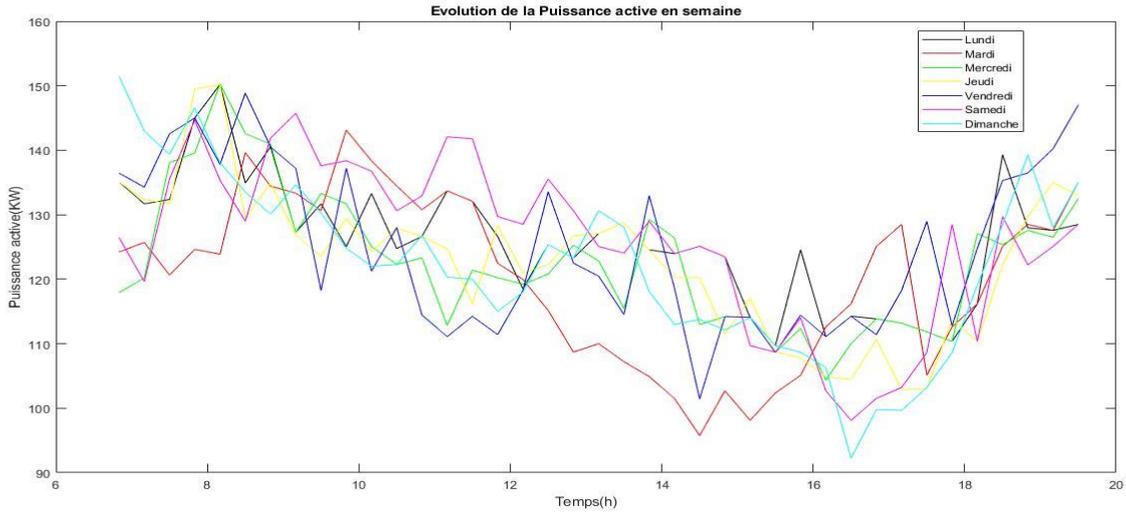


Fig. 4. Evolution de la puissance active

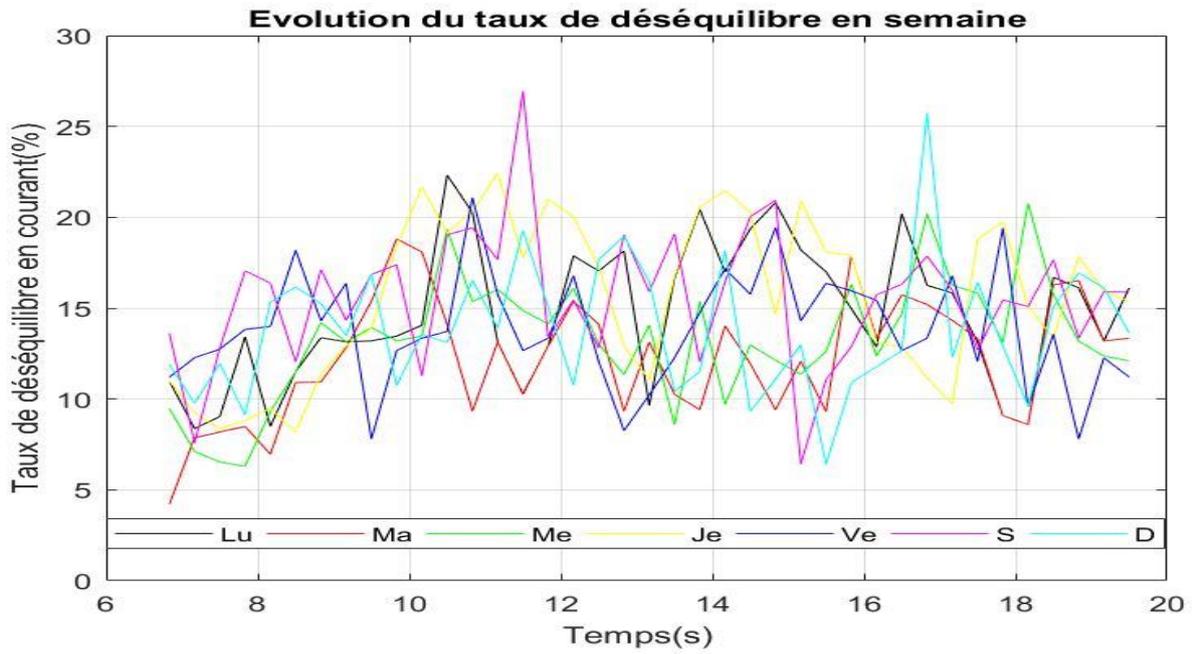


Fig. 5. Taux de déséquilibre en courant

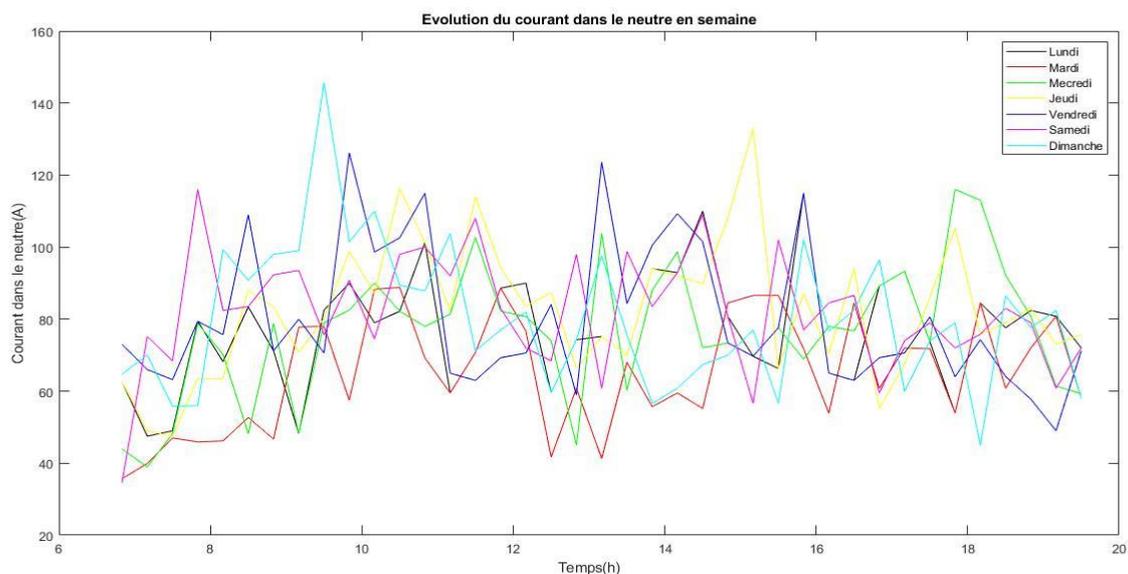


Fig. 6. Courant dans le neutre

2.2 ANALYSE DE LA DISTORSION EN HARMONIQUE ET PUISSANCE DÉFORMANTE

Pour toutes les mesures réalisées, la plus grande valeur du THD_i enregistrée est de 13.8% dans la troisième phase, pour un facteur de crête FC de 1.66. En observant les différentes mesures réalisées, l'harmonique de rang trois est le plus prépondérant comparativement aux autres rangs, avec un taux de distorsion allant de 3.9 à 13.2% comme présenté à la figure 7.

Les courants sont distordus dans les 3 phases, la figure 8 présente les trois ondes de courants qui ne sont pas sinusoïdaux avec des THD_i de 11 ; 10.5 et 12.9% respectivement pour la première, deuxième et troisième phase.

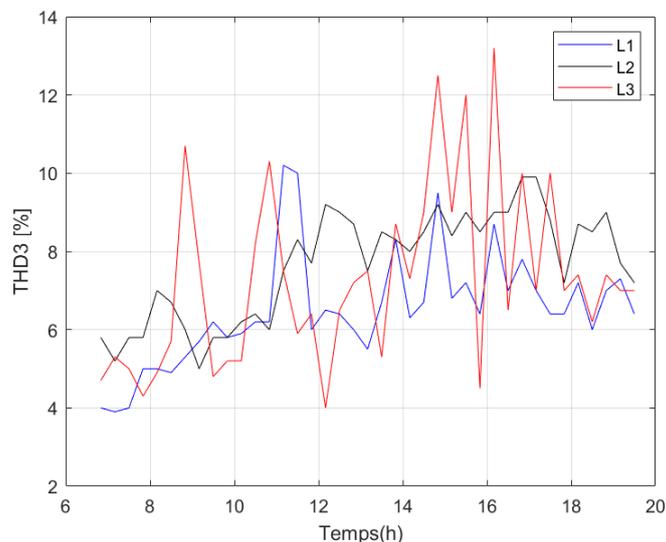


Fig. 7. Evolution l'harmonique de rang 3 dans les 3 phases

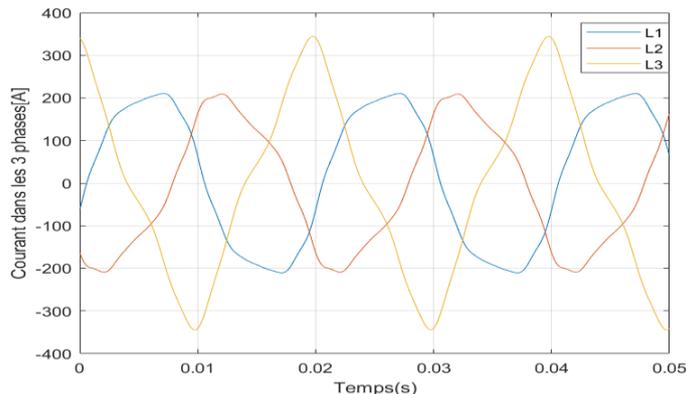


Fig. 8. Courants distordus dans les 3 phases

Les différentes composantes harmoniques présentes dans le réseau engendrent la puissance déformante. Cette puissance est déterminée par la relation (3) :

$$D = \sum_{i=1}^3 V_i * I_{Hi} \quad (3)$$

Avec i : le nombre de phases et I_{Hi} : le courant harmonique de la phase i .

Le profil de cette puissance est présenté à la figure 9. Pour toutes les mesures enregistrées au courant de la semaine, la puissance déformante max est de 14.725KVAD (Samedi le 25/09/2021 à 14h50) et la puissance min est de 6.7KVAD (Samedi le 25/09/2021 à 6h50).

Le courant dans le neutre est déformé avec des THD_i allant de 20 à 70%. Sur la figure10 se trouve la forme de l'onde distordue pour un THD_i de 70%. L'harmonique de rang 3 est prépondérant suite à la superposition de tous les harmoniques de rang trois du système dans le neutre.

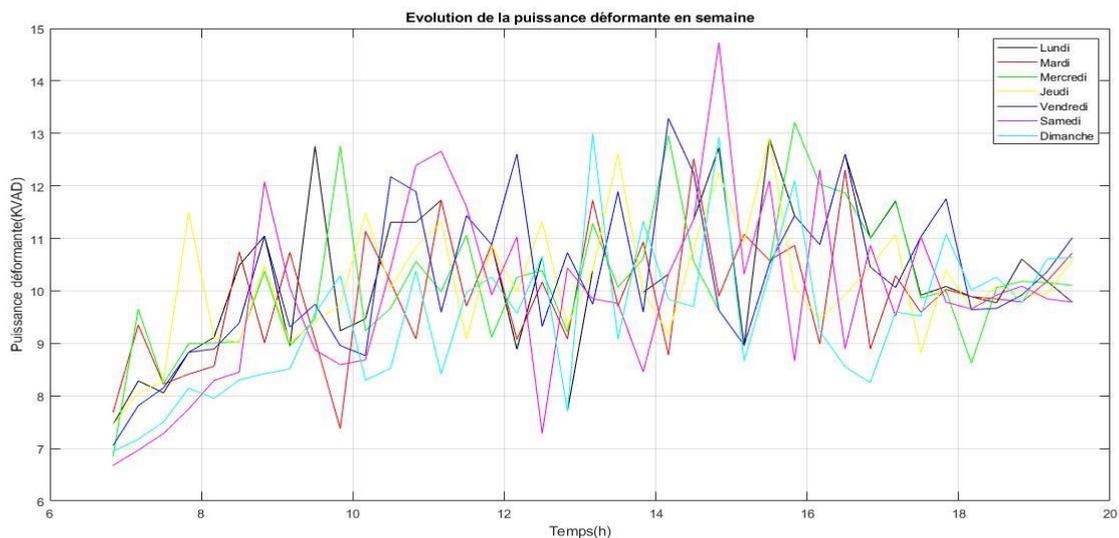


Fig. 9. Puissance déformante

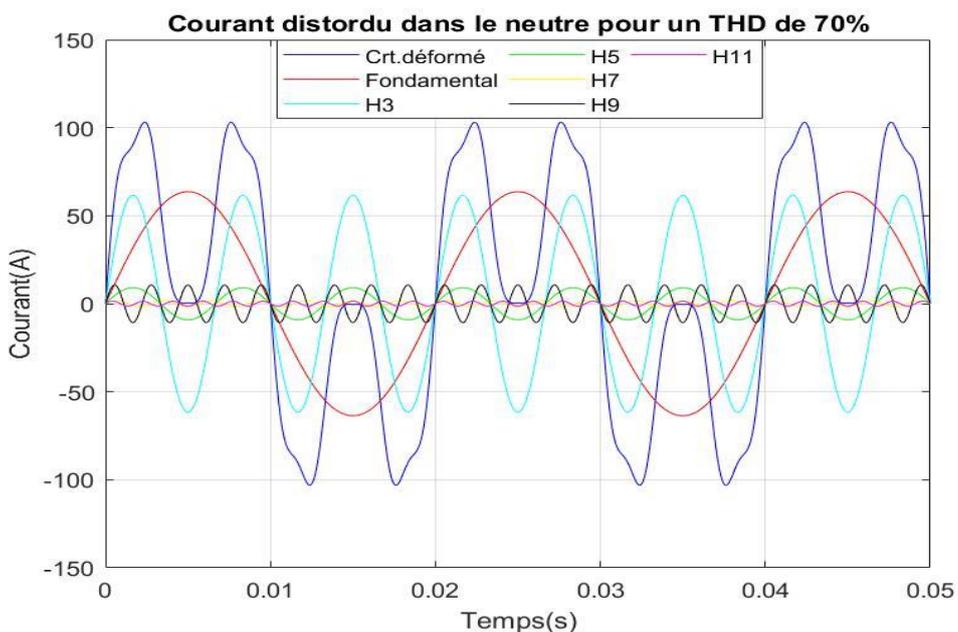


Fig. 10. Courant distordu dans le neutre pour un THD_i de 70%

3 MODÉLISATION DU FILTRE ACTIF PARALLÈLE (FAP) À QUATRE BRAS

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure 11, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal.

Ainsi l'objectif du FAP consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

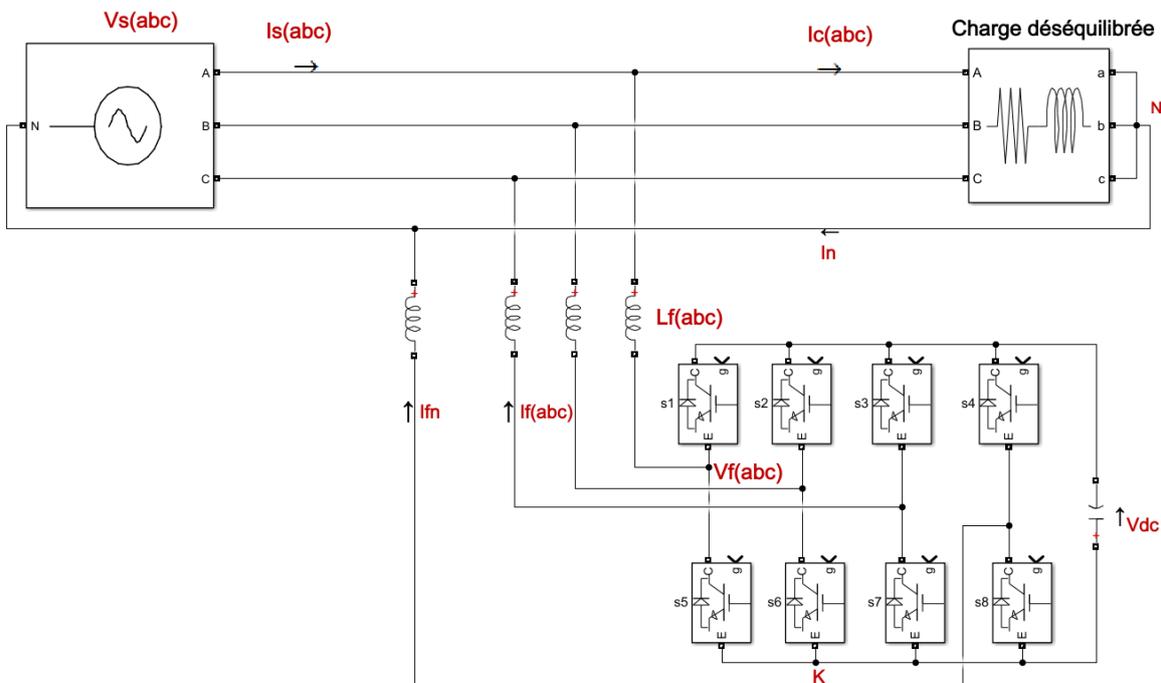


Fig. 11. Filtre actif parallèle à quatre bras

Dans les applications de fortes puissances, la structure des onduleurs à trois niveaux est la plus adaptée, par rapport à la structure à deux niveaux, du fait que les tensions et les courants de sortie présentent un taux de distorsion harmonique nettement inférieur. La figure 11 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de quatre bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir des interrupteurs (ils peuvent être soit des MOSFET pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des GTO pour les très grandes puissances et fréquences faibles) [28] et des diodes en antiparallèle qui assurent la circulation du courant de roue libre. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} , cette tension à ses bornes, est maintenue à une valeur quasi constante. La fluctuation de cette tension doit être faible d'une part pour ne pas dépasser la limite de tension des semi-conducteurs, et d'autre part, pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f), employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique [19].

Dans l'hypothèse où le système est équilibré, les tensions de la source (relations 4) sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} V_{Sa}(t) &= V_m \sin(\omega t) \\ V_{Sb}(t) &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{Sc}(t) &= V_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (4)$$

En raison de la topologie du filtre, les lois de Kirchhoff permettent d'écrire les relations (5) de la manière suivante :

$$\begin{aligned} V_{Sa} + V_{Sb} + V_{Sc} &= 0 \\ i_{Sa} + i_{Sb} + i_{Sc} &= 0 \\ i_{Ca} + i_{Cb} + i_{Cc} &= 0 \\ i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Les interrupteurs des bras de l'onduleur fonctionnent en complémentarité plus précisément quand celui du haut, T_i est conducteur celui du bas T_{i+4} est bloqué (T_i est " fermé " et T_{i+4} est " ouvert "). Par conséquent, il est possible de déduire les valeurs suivantes :

- $T_i = 1$ si T_{i+4} est ouvert $\rightarrow v_{fak} = V_{dc}$
- $T_i = 0$ si T_{i+4} est fermé $\rightarrow v_{fak} = 0$

Avec : $i = 1$ à 4

En appliquant la loi des mailles, les expressions du vecteur $V_{f(a,b,c)}$ sont définies par les relations (6) :

$$\begin{aligned} V_{fa} &= V_{Sa} - L_f \frac{di_{fa}}{dt} - Ri_{fa} = (T_1 - T_4) V_{dc} \\ V_{fb} &= V_{Sb} - L_f \frac{di_{fb}}{dt} - Ri_{fb} = (T_2 - T_4) V_{dc} \\ V_{fc} &= V_{Sc} - L_f \frac{di_{fc}}{dt} - Ri_{fc} = (T_3 - T_4) V_{dc} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} &= \frac{1}{C_{dc}} [T_1 i_{fa} + T_2 i_{fb} + T_3 i_{fc} - T_4 i_{fn}] \end{aligned} \quad (6)$$

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau 1. Ils sont obtenus (relations 7) grâce aux expressions suivantes :

$$V_{fa} = (T_1 - T_4) V_{dc}$$

$$V_{fb} = (T_2 - T_4) V_{dc} \quad (7)$$

$$V_{fc} = (T_3 - T_4) V_{dc} i_{dc} = T_1 i_{fa} + T_2 i_{fb} + T_3 i_{fc} - T_4 i_{fn}$$

Tableau 1. Tensions générées par l'onduleur à quatre bras

K	T₁	T₂	T₃	T₄	V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	V _{dc}	0	0
2	0	1	0	0	0	V _{dc}	0
3	1	1	0	0	V _{dc}	V _{dc}	0
4	0	0	1	0	0	0	V _{dc}
5	1	0	1	0	V _{dc}	0	V _{dc}
6	0	1	1	0	0	V _{dc}	V _{dc}
7	1	1	1	0	V _{dc}	V _{dc}	V _{dc}
8	0	0	0	1	-V _{dc}	-V _{dc}	-V _{dc}
9	1	0	0	1	0	-V _{dc}	-V _{dc}
10	0	1	0	1	-V _{dc}	0	-V _{dc}
11	1	1	0	1	0	0	-V _{dc}
12	0	0	1	1	-V _{dc}	-V _{dc}	0
13	1	0	1	1	0	-V _{dc}	0
14	0	1	1	1	-V _{dc}	0	0
15	1	1	1	1	0	0	0

4 DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DU FAP À QUATRE BRAS

Les trois principaux paramètres qu'il faut déterminer, dans la conception du circuit de puissance, afin d'assurer une commande adéquate et une bonne qualité de filtrage sont :

- La valeur de tension de référence de la capacité (V_{dcref}) ;
- La valeur de la capacité de stockage (C_{dc}) ;
- Le choix du type de filtre en sortie de l'onduleur de tension, ainsi que le dimensionnement de ses paramètres.

4.1 DÉTERMINATION DE LA TENSION DE RÉFÉRENCE DU BUS CONTINU (V_{dcref})

Une nouvelle hypothèse a été introduite [12] [20] selon laquelle, la valeur pratique de l'inductance L_f est généralement faible, suite au choix d'une fréquence de commutation élevée du FAP. Cela entraîne que la tension de l'onduleur V_{fa} est approximativement égale à la tension de source V_s . Donc, pour un coefficient de réglage maximal ($ma = 1$), l'expression de V_{dcref} est donnée par la relation (8) :

$$V_{dcref} = 2\sqrt{2}V_s \quad (8)$$

En plus, avec l'hypothèse que la tension V_{dcref} doit être réglée pour être à 10% de plus que la tension maximale d'entrée de l'onduleur, d'où la relation (9) :

$$V_{dcref} = (1.1) 2\sqrt{2}V_s \quad (9)$$

4.2 DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ DU CONDENSATEUR (C_{dc})

La détermination de la valeur de la capacité du condensateur de stockage d'énergie (C_{dc}) peut-être estimée en se basant sur le principe de l'échange instantané de l'énergie nécessaire pour subvenir à une augmentation ou une diminution d'un échelon de puissance imposé par la charge (régime transitoire), en appliquant le concept de l'équilibre d'énergie. Un autre principe réside dans la réduction des oscillations de la tension du bus continu V_{dc} imposées par les harmoniques de la charge non linéaire ou au déséquilibre de celle-ci en régime permanent, l'aspect déséquilibre s'applique aussi au cas d'une charge linéaire.

la sélection de la valeur de la capacité du condensateur C_{dc} est régie par la réduction des oscillations à la pulsation (2ω), cas le plus défavorable de la tension causé par le déséquilibre de la charge (absence d'une phase).

Considérons l'égalité des deux puissances instantanées (équation 10) des deux côtés de l'onduleur dans le repère stationnaire (α, β) :

$$\begin{aligned} \frac{P_{dc}^{\alpha\beta}}{ac} &= V_{dc} I_{dc} \\ &= v_{f\alpha}(t) \cdot i_{f\alpha}(t) + v_{f\beta}(t) \cdot i_{f\beta}(t) \\ &= \sqrt{2} V_{f\beta} \cdot \sin(\omega t) \cdot \sqrt{2} I_{f\beta} \cdot \sin(\omega t - \varphi_\beta) + \sqrt{2} V_{f\alpha} \cdot \cos(\omega t) \cdot \sqrt{2} I_{f\alpha} \cdot \cos(\omega t - \varphi_\alpha) \end{aligned} \quad (10)$$

Cette dernière expression peut s'écrire sous forme de l'équation (11) :

$$P_{dc/ac}^{\alpha\beta} = V_{f\beta} \cdot I_{f\beta} [\cos(\varphi_\beta) - \cos(2\omega t - \varphi_\beta)] + V_{f\alpha} \cdot I_{f\alpha} [\cos(\varphi_\alpha) + \cos(2\omega t - \varphi_\alpha)] \quad (11)$$

Relativement aux conditions de la charge, les deux cas suivant sont envisagés :

- Si la charge triphasée est équilibrée, alors $V_{f\beta} = V_{f\alpha} = V_f$; $I_{f\beta} = I_{f\alpha} = I_f$ et $\varphi_\beta = \varphi_\alpha = \varphi$, et l'équation (11) peut s'écrire sous forme de l'équation (12) :

$$\frac{P_{dc}^{\alpha\beta}}{ac} = V_{dc} \cdot i_{dc} = 2V_f \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) \quad (12)$$

Nous constatons que le bus continu ne contient pas d'oscillations.

- Si la charge triphasée est déséquilibrée, alors la relation (13) est donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{P_{dc}^{\alpha\beta}}{ac} &= V_{dc} \cdot i_{dc} = \underbrace{[V_{f\beta} \cdot I_{f\beta} \cdot \cos(\varphi_\beta) + V_{f\alpha} \cdot I_{f\alpha} \cdot \cos(\varphi_\alpha)]}_{\text{terme continu}} \\ &+ \underbrace{[-V_{f\beta} \cdot I_{f\beta} \cdot \cos(2\omega t - \varphi_\beta) + V_{f\alpha} \cdot I_{f\alpha} \cdot \cos(2\omega t - \varphi_\alpha)]}_{\text{terme alternatif}} \end{aligned} \quad (13)$$

Il apparait que le premier terme de la puissance (terme continu) de l'équation (13) est constant et correspond à la valeur que le FAP doit produire pour maintenir la tension du bus continu constante. Alors que le deuxième terme (terme alternatif) est une puissance du second harmonique produit par le FAP pour compenser la puissance de la charge déséquilibrée. Le terme alternatif de la puissance provoquera des oscillations du second harmonique de la tension superposée au terme continu de la tension du bus continu.

En prenant le cas extrême du déséquilibre, où : $\varphi_\beta = \varphi_\alpha - \pi$,

$V_{f\beta} = V_{f\alpha} = V_{dc}/2$, $I_{f\beta} = 0$, $\frac{I_{f\alpha}}{2} = I_{dc}$, de l'équation (13) nous obtenons donc les équations (14) et (15) :

$$P_{dc/ac}^{\alpha\beta} = V_{dc} \cdot I_{dc} = \left[\frac{V_{dc}}{2} I_{f\alpha} \cdot \cos(\varphi_\alpha) \right] + \left[\frac{V_{dc}}{2} I_{f\alpha} \cdot \cos(2\omega t \varphi_\alpha) \right] \quad (14)$$

$$i_{dc} = \underbrace{[I_{dc} \cdot \cos(\varphi_\alpha)]}_{I_{dc} (=)} + \underbrace{[I_{dc} \cdot \cos(2\omega t - \varphi_\alpha)]}_{I_{dc} (2\omega)} \quad (15)$$

A partir du deuxième terme (relation 15) du courant oscillant à la pulsation (2ω), la tension alternative crête- crête du bus continu (\tilde{v}_{dc}) se détermine par la relation (16) :

$$\tilde{v}_{dc}(t) = \frac{1}{C_{dc}} \int I_{dc} \cdot \cos(2\omega t - \varphi_\alpha) dt = \frac{I_{dc}}{2 \cdot \omega \cdot C_{dc}} \sin(2\omega t - \varphi_\alpha) \quad (16)$$

Alors l'amplitude des oscillations (\tilde{v}_{dc}) est déterminée par l'équation (17) et de cette équation est déduite la capacité du condensateur donnée par la relation (18) :

$$\tilde{v}_{dc} = \frac{I_{dc}}{2 \cdot \omega \cdot C_{dc}} \quad (17)$$

$$C_{dc} = \frac{I_{dc}}{2 \cdot \omega \cdot \tilde{v}_{dc}} \quad (18)$$

4.3 DÉTERMINATION DU FILTRE DE SORTIE (L_f)

Le dimensionnement de L_f est réalisé avec la contrainte selon laquelle pour une fréquence de commutation donnée, la pente du courant I_f est plus petite que celle d'une porteuse triangulaire définissant cette fréquence de commutation. La pente de la porteuse triangulaire χ est définie par l'équation (19) :

$$\chi = 4 \cdot \varepsilon \cdot f_{ond} \quad (19)$$

Telle que: ε est l'amplitude de l'onde triangulaire, f_{ond} est la fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif.

La relation (20) nous donne alors la pente maximale dans le cas d'un filtre actif à point milieu :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{0.5V_{dc} + V_{Fmax}}{L_f} \quad (20)$$

D'où une valeur (relation 21) de l'inductance L_f est donnée par :

$$L_f = \frac{0.5V_{dc} + V_{Fmax}}{4 \cdot \varepsilon \cdot f_{ond}} \quad (21)$$

5 IDENTIFICATION DES COURANTS DE RÉFÉRENCE PAR LA MÉTHODE DE RÉFÉRENTIEL SYNCHROME

Dans la méthode du repère synchrone, appelée aussi méthode des courants instantanés d et q, les courants de la charge sont transformés dans le repère synchrone. Elle permet d'obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibrée [19].

La figure 12 représente le schéma de principe de cette méthode.

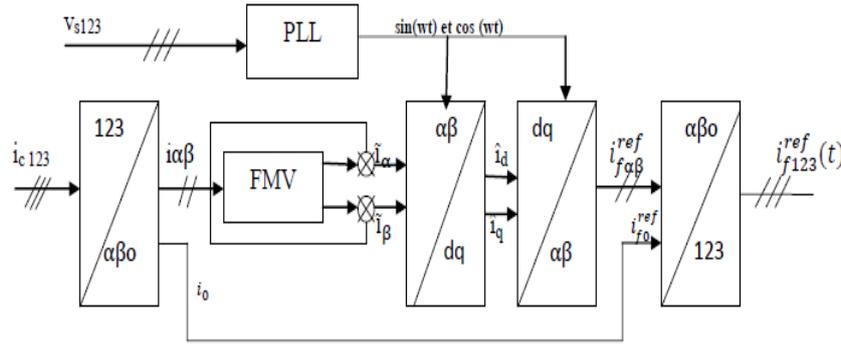


Fig. 12. Extraction des harmoniques par méthode de référentiel synchrone

A partir des courants i_{α} et i_{β} obtenus par la transformation de Concordia (relation 22) les composantes harmoniques de courants sont extraites à l'aide d'un filtre multi variables. Dans ce cas, les courants \tilde{i}_{α} , \tilde{i}_{β} sont transformés dans un référentiel synchrone d-q. Ce dernier étant synchronisé avec les tensions de source, et tournant à la même fréquence. Cette transformation est définie par la relation (22)

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{\alpha} \\ \tilde{i}_{\beta} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Où (ωt) représente la position angulaire du repère tournant, est une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées.

Enfin, les courants de référence (relation 23) sont générés dans le plan triphasé 1-2-3 et définis comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (23)$$

L'une des caractéristiques les plus remarquables de cet algorithme est que les courants de référence sont directement obtenus à partir des courants de la charge polluante, sans tenir compte des tensions du réseau. Ceci est un avantage important puisque la génération des courants de compensation ne sera affectée ni par les distorsions, ni par les déséquilibres présents dans les tensions de source, renforçant ainsi la robustesse et la performance de la compensation. Cependant, la transformation du plan α - β vers le référentiel d-q des signaux en sinus et cosinus, synchronisés avec les tensions simples du réseau, est indispensable. Ces derniers sont créés en utilisant, dans chaque phase, une boucle à verrouillage de phase, plus connue sous la nomination anglo-saxonne Phase Locked Loop (PLL) [19].

6 SYNTHÈSE D'UN CONTRÔLEUR ANFIS POUR LA RÉGULATION DE LA TENSION DU BUS CONTINU

6.1 DESCRIPTION ET STRUCTURE DU CONTRÔLEUR ANFIS PROPOSÉ

Le contrôleur neuro-flou développé dans cette partie comprend une entrée 'e' et une seule sortie 'V' qui représentent respectivement l'erreur et la commande (Figure 13).

Nous avons utilisé un contrôleur ANFIS pour que la tension moyenne aux bornes du condensateur soit maintenue à une valeur quasi constante, ce contrôleur permet une génération automatique de règles flous à dix ensembles basées sur le modèle d'inférence de Sugeno.

6.2 APPRENTISSAGE DU CONTRÔLEUR "ENTRAÎNEMENT D'UN RÉSEAU ANFIS"

L'apprentissage de notre contrôleur (Figure 14) est effectué par le biais de l'algorithme de rétropropagation, afin de déterminer les paramètres des prémisses (ajustement des paramètres liés aux fonctions d'appartenance) et l'estimation des paramètres conséquents par la méthode des moindres carrés. Ce qui a pour appellation "apprentissage hybride" [18].

Le réseau ANFIS utilisé dans ce travail a été programmé par la boîte à outil de la logique floue dans le logiciel Matlab (version 2018a), avec lequel les règles floues (Si-Alors) avec leurs fonctions d'appartenance appropriées à 10 ensembles ont été construites. Après apprentissage du système neuro-flou adaptatif (ANFIS), nous avons testé sa généralisation, en présentant des données de validation (figure 14).

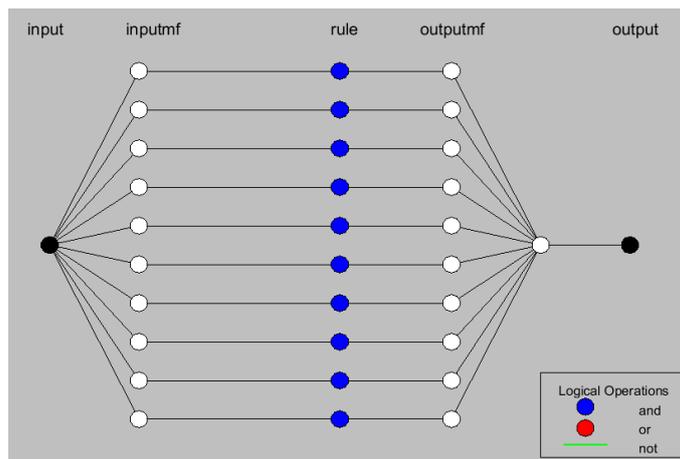


Fig. 13. Structure neuronale proposée par Matlab

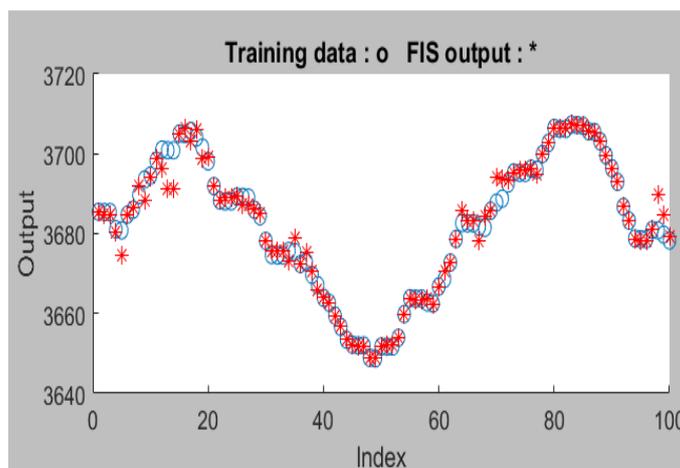


Fig. 14. Test d'apprentissage

7 PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Dans cette section nous nous sommes intéressés à l'application de la commande ANFIS (régulation de la tension du bus continu) dans le filtrage actif parallèle (figure 15). L'identification des courants de référence est faite par la méthode de référentiel synchrone avec FMV (figure 16) et la technique appliquée pour la commande des interrupteurs de notre filtre est la commande par hystérésis modulée (figure 16).

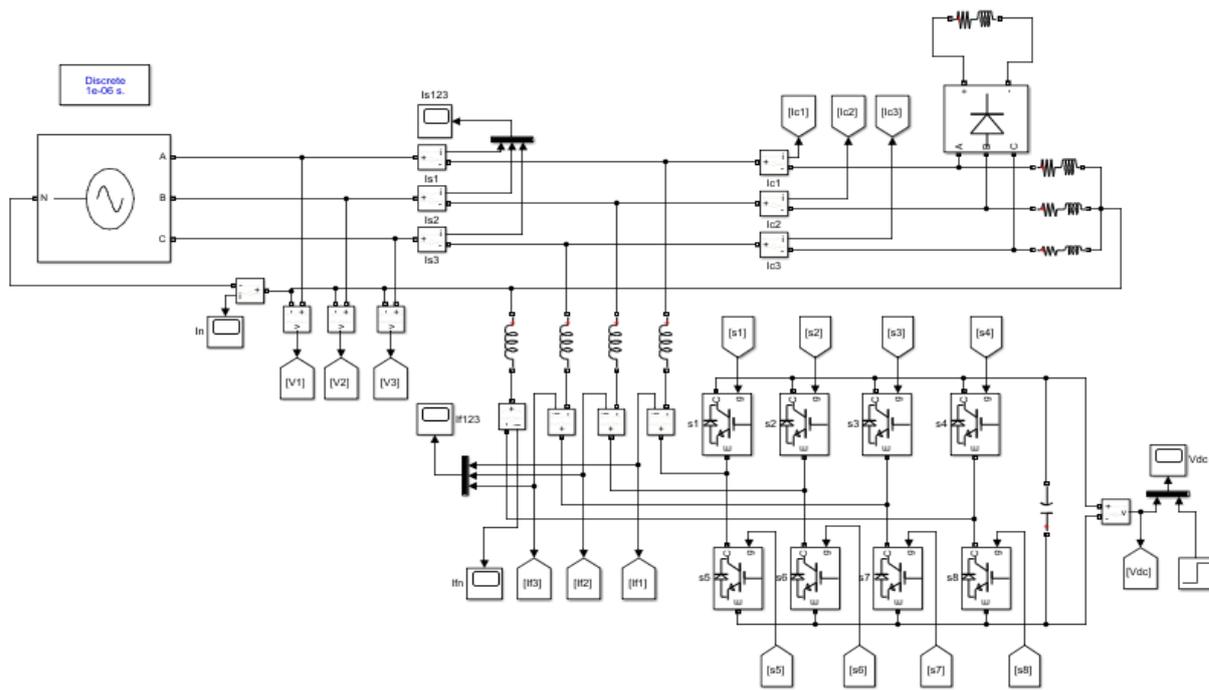


Fig. 15. Circuit de puissance du filtre actif parallèle à quatre bras

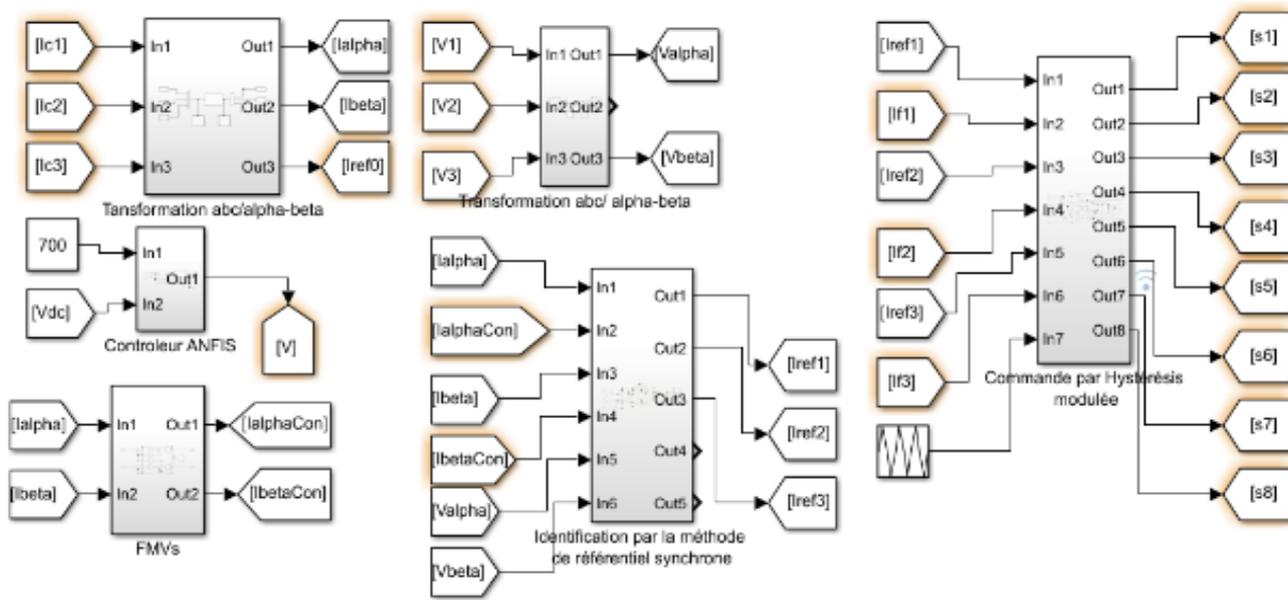


Fig. 16. Contrôle et commande du filtre

Le tableau 2 reprend les paramètres utilisés dans notre modèle pour la réalisation du filtrage.

Tableau 2. Paramètres de simulation du filtre actif parallèle

Système	Désignations	Valeurs
Source d'alimentation	Tension efficace simple Fréquence	$V_s = 220V$ $f = 50Hz$
Paramètres du filtre	Tension de référence Capacité du condensateur Inductance de couplage Bande hystérésis	$V_{dc\text{réf}} = 700V$ (relation 9) $C_{dc} = 3200\mu F$ (relation 18) $L_f = 7mH$ (relation 21, pour une fréquence de commutation fixée à 23.5kHz) $\Delta H = 0.02A$
Charge linéaire	Trois charges constituées d'un circuit RL couplées en étoile.	$P_1 = 37.88kW, Q_1 = 8.31kVAR$ $P_2 = 27.98kW, Q_2 = 8.6 kVAR$ $P_3 = 57.64kW, Q_3 = 8.6 kVAR$
Charge non linéaire	Pont redresseur triphasé alimentant une charge RL	$P_R = 8kW$ $Q_L = 3 kVAR$

Le modèle à simuler a été réalisé par la toolbox Simulink du logiciel Matlab version 2018a, le temps de simulation a été fixé à 0.5 seconde.

Avant filtrage, notre réseau a présenté un déséquilibre comme présenté à la figure 17. La figure 18 illustre le spectre de la première phase pour un THD de 13.82%.

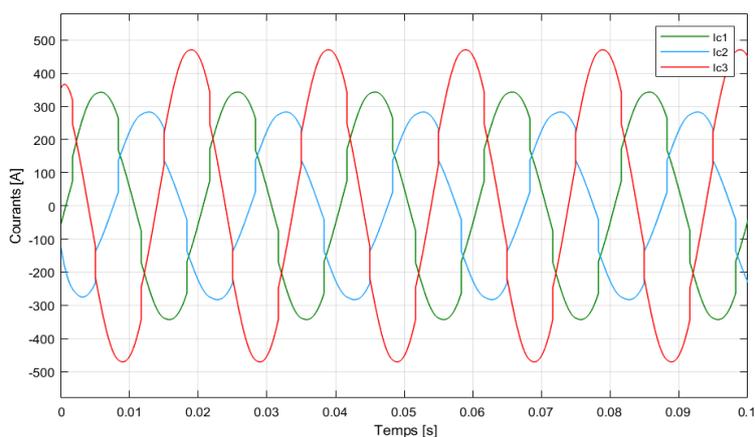


Fig. 17. Courants de la source en déséquilibre

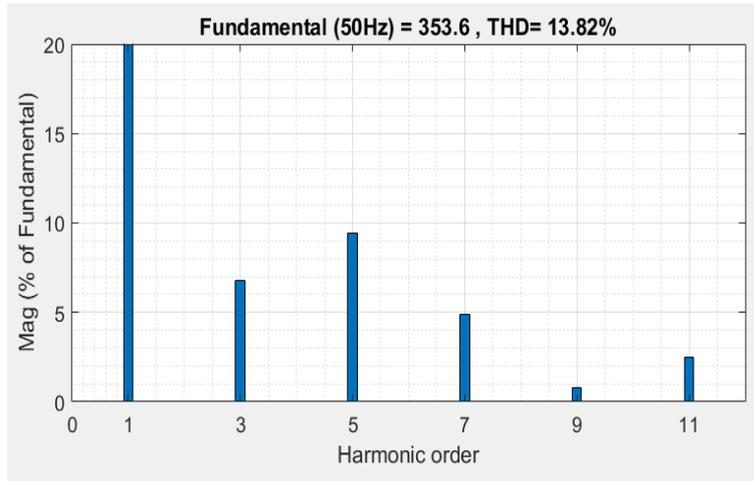


Fig. 18. Spectre du courant de la source

Le branchement du filtre au réseau nous a permis d'éliminer le déséquilibre et de réduire le taux de distorsion en harmonique.

La figure 19 nous montre que pour une tension de référence de 700V, le régulateur ANFIS qui contrôle la tension du bus continu a permis d'atteindre cette consigne après un temps d'environ 0.06 seconde et de la maintenir autour de celle-ci.

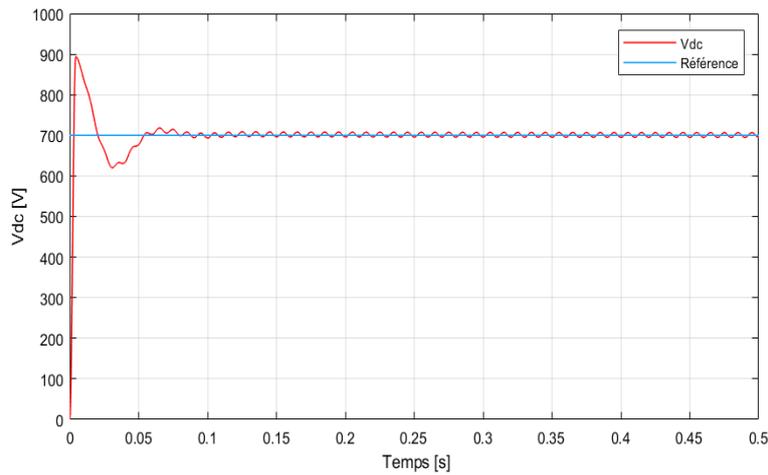


Fig. 19. Tension du bus continu Vdc

L'utilisation de l'algorithme d'identification par la méthode de référentiel synchrone, nous a permis de déterminer les trois courants de référence à injecter dans le réseau. Ces différents courants sont illustrés par les figures 20, 21 et 22 respectivement pour la première, deuxième et troisième phase.

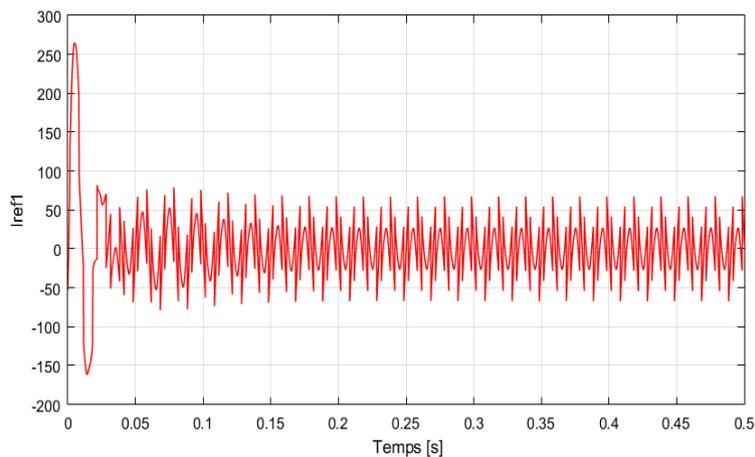


Fig. 20. Courant de référence de la première phase

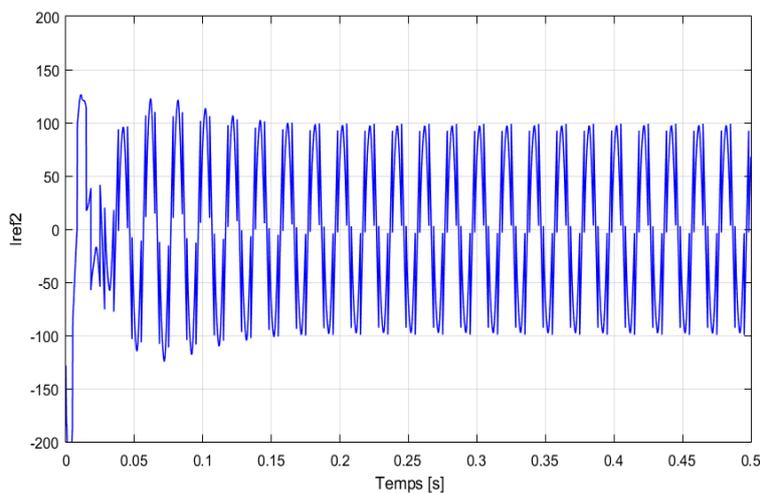


Fig. 21. Courant de référence de la deuxième phase

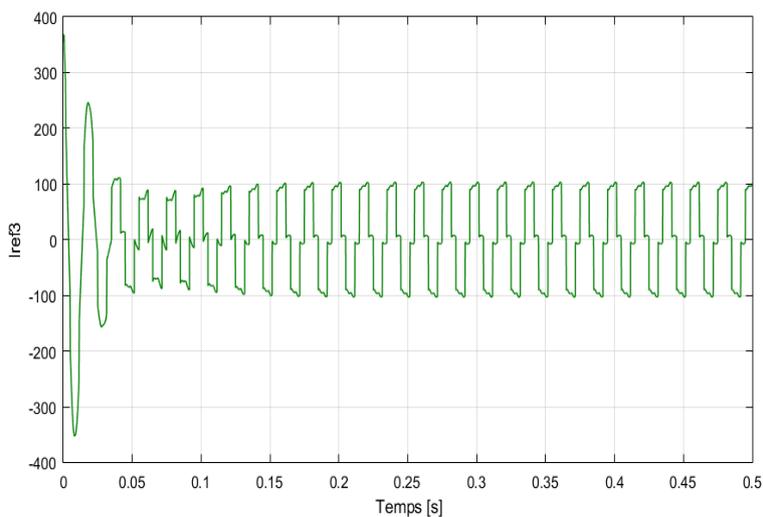


Fig. 22. Courant de référence de la troisième phase

Après injection des courants de références dans le réseau, les figures 23 et 24 montrent que du côté transformateur, les tensions simples sont en équilibre ainsi que les courants dans les trois phases. La figure 25 reprend le spectre de l'onde de tension qui est une sinusoïde pure ($THD_u = 0\%$).

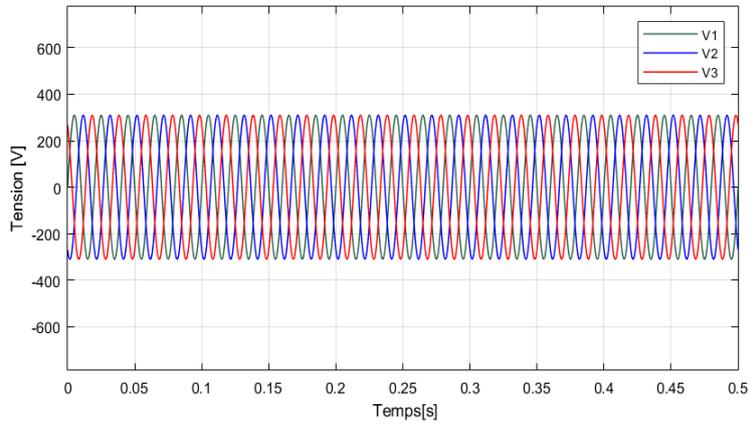


Fig. 23. Tensions simples de la source

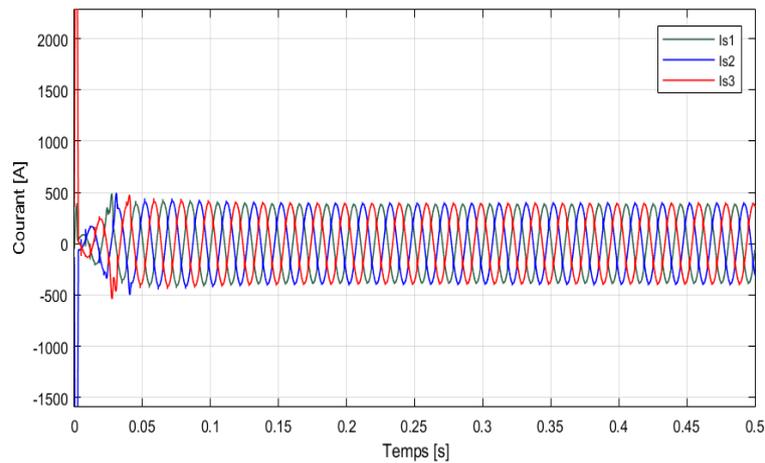


Fig. 24. Ondes de courants après filtrage

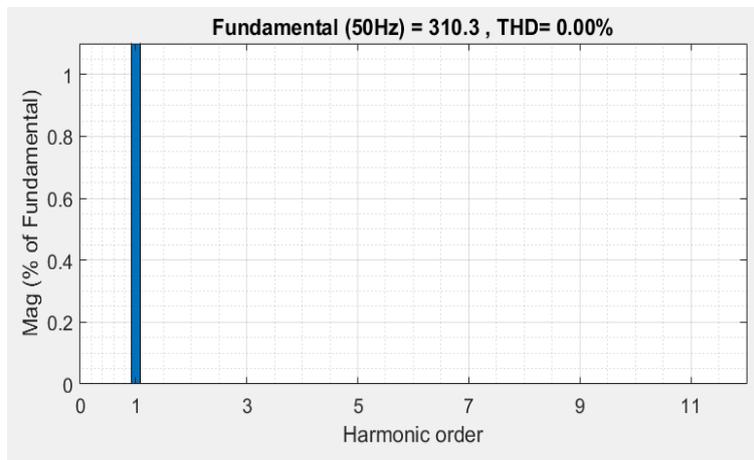


Fig. 25. Spectre de l'onde de tension

Le THD_I doit normalement être inférieur à 5% après filtrage, par l'injection de différents courants de référence dans le réseau, à l'exemple de la première phase, le THD_I est passé de 13.82 à 1.59 % (figure 26).

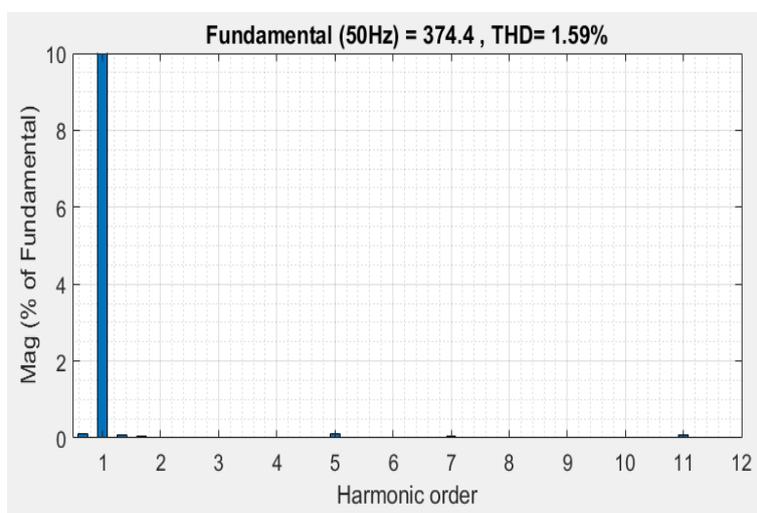


Fig. 26. Spectre de l'onde de courant après filtrage

Par rapport à la présence du courant dans le neutre (figure 27), nous remarquons que ce dernier est éliminé (figure 28) après filtrage par l'injection d'un courant dans ce dit neutre.

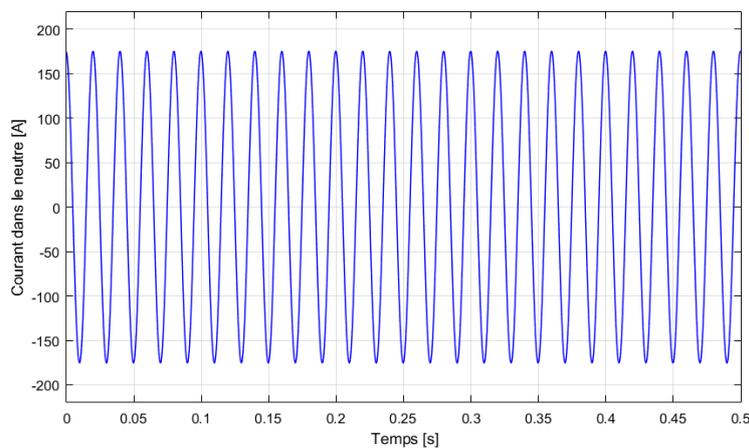


Fig. 27. Courant dans le neutre avant filtrage

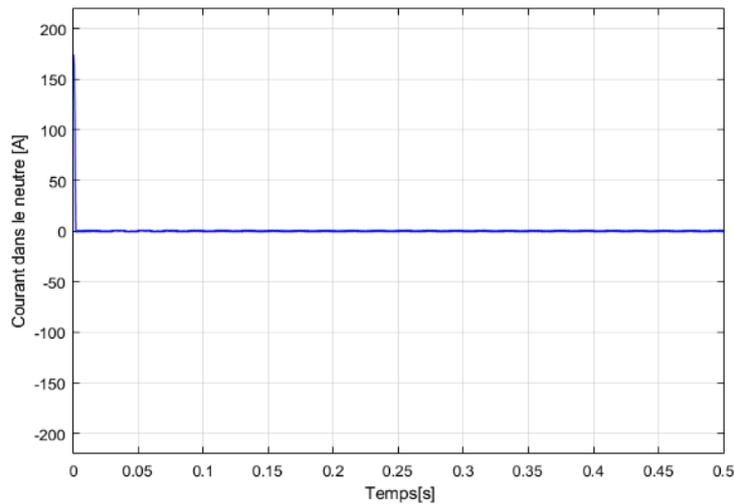


Fig. 28. Courant dans le neutre après filtrage

8 CONCLUSION

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la qualité d'énergie électrique et plus particulièrement de la compensation des déséquilibres et de la pollution en harmoniques qui sont à la base de plusieurs perturbations et endommagement de certains équipements raccordés au réseau basse tension.

D'où, l'objectif de ce travail était d'analyser l'état du réseau électrique (déséquilibres et harmoniques) et de proposer une technique de filtrage moderne qui, en temps réel doit éliminer les déséquilibres et réduire le taux de distorsion en harmoniques.

Les expérimentations effectuées dans cette étude renseignent ce qui suit :

Les mesures réalisées ont prouvé après analyse que le réseaux basse tension ciblé est en déséquilibre avec des taux de déséquilibre allant jusqu'à 26%, et la présence des charges non linéaires avec des taux de distorsion en harmonique de courant allant jusqu'à 13.8% a engendré une puissance déformante maximale de 15kVAD.

Les résultats obtenus après simulation sur Matlab-Simulink ont prouvé que, le filtrage actif parallèle appliqué au réseau, contrôlé au moyen d'un régulateur neuro-flou est efficace et a permis d'éliminer le déséquilibre et de réduire le taux de distorsion en harmonique de courant de 13.8 à 1.59%.

Ce taux étant inférieur à 5% est donc acceptable dans le réseau.

REFERENCES

- [1] A. Julian et O. Fernandez, Intégration des Véhicules Electriques dans le réseau électrique résidentiel : impact sur le déséquilibre et stratégies V2G innovantes, Thèse de doctorat, université de Grenoble, 2014.
- [2] O. Malaoui, Élimination du déséquilibre dans les réseaux électriques, Mémoire de Master, Ecole supérieure de technologies industrielles - ANNABA, 2020
- [3] H. Sakkou, Conception d'un compensateur actif multifonctions corrigeant toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaires et les fours à arc, Mémoire de Master, Ecole de technologie supérieure Université du Québec, 2007
- [4] V. Beauvois, Qualité de la tention, qualité de l'électricité, ATT00254, Fascicule technique, Université de Liège, 2008.
- [5] B. Farida, Qualité de l'énergie électrique et norme IEEE-519. Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, 2009.
- [6] E. Félice, La qualité des réseaux électriques, Article, p33, Mars 2015.
- [7] D. Xuan-Linh D, H. Emmanuel, B. Hamid B, M. Petit, H. Pham, Etude de l'équilibrage des courants de phases par convertisseur statique dans un réseau de distribution, Article, Saint-Louis, France. hal-01083910, pp 1-11, Juin 2014
- [8] I. Vanya, Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique, Mémoire de Master, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, Octobre 2009

- [9] A. Badr-Eddine, Filtrage d'harmoniques dans un réseau mixte photovoltaïque électrique par estimation adaptative coupe-bande, Mémoire de Master, Université du Québec à Montréal, Décembre 2017
- [10] S. Messouter et L. Djedjiga, Analyse du courant du neutre dans un système triphasé en présence de charges non linéaires, TFE, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009
- [11] H. Nassar, Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation, Thèse de Doctorat, Ecole de technologie supérieure Université du Québec, Janvier 2003.
- [12] C. Abdelmadjid, Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires, Thèse de doctorat, Université de Ferhat Abbas de Sétif, Octobre 2010.
- [13] M. Epanya, Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique, Mémoire de Master, Université du Québec, Septembre 2010.
- [14] D. Thirault, Architectures des Réseaux de Distribution pour l'Electrification rurale des Pays en Développement, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, mars 2004.
- [15] T. Wildi et G. Sybille, Electrotechnique, Troisième édition, Institut de recherche d'Hydro-Québec, Université De Boeck, ISBN PUL 2-7637-7593-4, pp 810-831, 2000.
- [16] T. Abderrahmane et Y. Slimani, Etude des systèmes électriques perturbés déséquilibrés et courts-circuits, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Septembre 2014.
- [17] H. Alilouch, Conception et analyse des performances d'un contrôleur flou pour un système de réglage de tension automatique, Mémoire de Master, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, Mars 2020.
- [18] S. Hafsia, Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra, Mars 2015.
- [19] I. Ghadbane, Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle par Différents régulateurs, Mémoire de Master, Université Mohamed Kheider – Biskra, Février 2011.
- [20] O. Saihi, Modélisation et simulation des filtres de puissance actifs, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi de Oum El Bouaghi, Juin 2014.
- [21] F. Benikhlef, Apport de la logique floue et des algorithmes génétiques à l'optimisation de la commande IFOC d'un moteur asynchrone triphasé, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Octobre 2013.
- [22] S. Chekroun, Commande neuro-floue sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone triphasée, Mémoire de Master, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique d'Oran, Octobre 2009.
- [23] T. Amane, Contribution des réseaux neuro-flous et algorithmes génétiques à la reconnaissance de la parole, Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, Mai 2010.
- [24] K. Guesmi et N. Essounboui, Synthèse d'un contrôleur flou pour la régulation d'un convertisseur statique, Mémoire de Master, Université de Reims Champagne-Ardenne, Septembre 2019.
- [25] D. Abdellah, Répartition optimale des puissances utilisant les techniques de l'intelligence artificielle, Thèse de Doctorat, Université des frères Mentouri Constantine, Juillet 2016
- [26] https://fr.electricalinstallation.org/frwiki/Mesure_des_harmoniques_dans_les_reseaux_electriques. (s.d.). [En ligne] consulté le 15/09/2021.
- [27] H. Djeghloud, Filtrage actif de puissance, Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [28] Xu, J. (2018). Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de LORRAINE, 1994.
- [29] K. Djazia, Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus, Thèse de Doctorat, Université FERHAT ABBAS – SETIF 1, 2015.