

## MINIMISATION DES COURANTS HARMONIQUES PAR LA TECHNIQUE D'OPTIMISATION DE LA COMMUTATION FORCÉE D'UN CONVERTISSEUR AC/DC

Reçu le 30/01/2002 – Accepté le 11/03/2003

### Résumé

Depuis quelques années, le nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie est en constante progression. Ces charges non-linéaires génèrent des courants harmoniques qui polluent le réseau électrique. La solution traditionnelle, basée sur le principe des filtres passifs s'avère insuffisante pour la dépollution. L'évolution de la technologie des semi-conducteurs (IGBT, GTO, THYRISTOR, ...), a permis d'élaborer d'autres solutions nouvelles plus performantes. Dans ce travail nous présentons une technique d'optimisation de la commutation forcée d'après le principe de la MLI qui offre de bonnes perspectives à la dépollution des réseaux.

**Mots clés:** THD, MLI, Harmonique, Angle de commutation, Redresseur.

### Abstract

Since some years, the number of static converters connected to networks of energy distribution is in constant progression. These no-linear loads generate the harmonic currents that pollute the electric network. The traditional solution, based on the passive filter principle, proves to be insufficient to eliminate harmonics. The evolution of the semiconductor technology (IGBT, GTO, THYRISTOR,...), permitted to elaborate other more effective new solutions. In this work we present a technique of optimisation of the commutation forced, based on the principle of the PWM that offers good perspectives for the elimination of the harmonics in the electric network.

**Keywords:** THD, PWM, Harmonic, Commutation angle, Rectifier.

### C. BENACHAIBA

Centre Universitaire de Béchar  
BP 417, Béchar (Algérie)

### B. MAZARI

### M. RAHLI

Université d'Oran  
U.S.T.O., BP 1505  
Oran El M'ouar (Algérie)

### ملخص

مند عدة سنوات وعدد المحولات الساكنة المربوطة في شبكة توزيع الطاقة في تزايد. هذه المحولات الغير خطية تولد تيارات ارمونيكية تلوث الشبكة الكهربائية. الحل البدائي المعتمد على مبدأ الترشيح الخامل قد أضحي غير كافي. تقدم تكنولوجيا النصف نوافل قد سمحت بتوظيف حلول جديدة أكثر فعالية. في هذا العمل نقدم طريقة أفضل للاستبدال الإجباري وهذا لتحقيق مبدأ MLI يسمح بتطبيقات جيدة لعدم التلوث الشبكة.

**الكلمات المفتاحية:** مفهوم، THD، MLI، ارمونيك، راوية الاستبدال.

L'utilisation massive des charges non-linéaire à l'échelle domestique et industrielle provoque la distorsion de la tension et du courant dans le réseau électrique [1]. Comme conséquence, les harmoniques, les sub-harmoniques, et inter-harmoniques [2] sont souvent présents dans le spectre de la tension ou du courant. La distorsion harmonique peut produire divers effets nocifs sur le réseau électrique et son environnement. De nombreuses publications ont traité des cas où ces effets ont atteint des niveaux intolérables [3]. L'échauffement excessif, l'interférence avec les réseaux de télécommunications, le dysfonctionnement électronique, l'excitation de résonance peuvent être cités comme exemples. Différentes solutions traditionnelles ont été utilisées pour l'élimination ou la réduction de l'effet des harmoniques, parmi eux, les filtres passifs. Ces derniers, basé sur le procédé de filtrage des harmoniques qui consiste à placer en parallèle sur le réseau électrique d'alimentation une impédance de valeur très faible, autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Le filtrage est en réalité une opération délicate, car l'impédance du réseau peut non seulement modifier sa performance mais aussi dans certains cas former un circuit résonant.

L'évolution de la technologie des semi-conducteurs a permis de répondre grâce aux nouveaux composants tel que l'IGBT ou le GTO, par de nouvelles solutions aux perturbations des réseaux. Parmi celles-ci, on peut citer notamment les redresseurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI) et les filtres actifs. Avec ces nouvelles structures les problèmes liés aux équipements passifs (batteries de condensateurs et filtres passifs), comme les résonances, les surcharges et la forte dépendance de l'environnement disparaîtront [4]. Le principe du convertisseur ac/dc à commande MLI [5] consiste à lier deux sources de natures différentes par le biais des interrupteurs semi-conducteurs à fermeture et ouverture commandée, auxquels sont éventuellement associées des diodes.



Dans cet article, nous présentons les résultats de l'algorithme développé qui vérifie la contrainte de réalisation (angles de commutations positifs inégaux, et croissants par quart de période), et en même temps la qualité du spectre Eq. (7).

### APERÇU SUR LES TECHNIQUES MLI

La technique de modulation consiste en la génération d'une onde MLI composée d'une succession d'impulsions de largeurs variables. En général, la technique de modulation se réalise par une modulatrice et une porteuse. Elle permet d'éliminer une partie des harmoniques basses fréquences perturbant, le plus, le réseau.

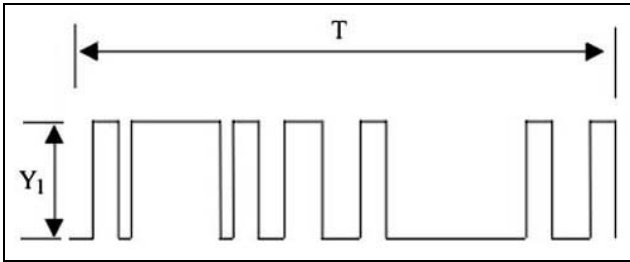


Figure 1: Signal MLI.

L'onde MLI de la figure 1 présente un spectre riche en harmoniques, dont la décomposition en série de Fourier donne:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\omega t) d(\omega t) \quad (1)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (3)$$

Le calcul des coefficient de Fourier donne:

$$b_n = \frac{Y_1}{n\pi} \sum_{i=0}^{Nc-1} (-1)^i \cos(n\alpha_i) \quad (4)$$

De la même manière, on a:

$$a_n = \frac{Y_1}{n\pi} \sum_{i=0}^{Nc-1} (-1)^{i+1} \sin(n\alpha_i) \quad (5)$$

Considérons une onde MLI à valeur moyenne nulle et possédant des symétries en  $\frac{\pi}{2}$  et  $\pi$ . On déduit dans ce cas que les coefficients de Fourier  $a_n$  et  $b_n$  sont nuls si  $n$  est pair. Les termes  $b_n$  peuvent être calculés à partir des  $c$  commutations contenues dans un quart de période.

$$b_n = 2 \frac{Y_1}{n\pi} \left[ -1 + 2 \sum_{i=0}^{C-1} (-1)^i \cos(n\alpha_i) \right] \quad (6)$$

### MLI à échantillonnage naturel

Cette technique MLI est la plus simple, elle consiste à comparer un signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdal (modulatrice) [5]. L'intersection de ces deux

signaux définit les instants de commutations des interrupteurs.

### MLI à échantillonnage régulier

Les instants de commutations sont déterminés par l'intersection de la porteuse triangulaire et d'une modulatrice échantillonnée et constante sur la période porteuse.

La largeur d'une impulsion est directement proportionnelle à l'amplitude de la de la modulatrice échantillonnée sur la période porteuse correspondante.

### MLI optimisée

La MLI optimisée consiste à déterminer les angles de commutation selon certains critères d'optimisation. Elle est donc plus sophistiquée. On peut, par exemple, soit minimiser une bande d'harmoniques soit éliminer complètement certains harmoniques [6].

### TECHNIQUE D'OPTIMISATION

La technique consiste à déterminer, suivant le nombre de commutation  $c$  par quart de période, les valeurs d'angle de commutation optimisées qui éliminent les harmoniques sélectionnés. Pour cela, il suffit de résoudre un système d'équations non-linéaire de nature transcendantal avec les contraintes ci-dessous; de multiples solutions sont possibles, l'équation du fondamental en fonction de l'indice de modulation  $m$  (qui est la rapport entre l'amplitude  $I_1$  et le courant continu  $I_d$ ) et les autres équations étant égales à zéro.

$$0 < \alpha_0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \frac{\pi}{2}$$

Les résultats obtenus sont utilisés comme valeurs initiales pour minimiser la fonction objective qui représente le taux de distorsion harmoniques THD défini par IEEE standard 519-1992 comme:

$$THD = \frac{1}{A_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{N=50} A_n^2} \quad (7)$$

C'est le deuxième critère d'optimisation.

### Elimination des harmoniques

#### a- Deux commutations par quart de période (C2)

##### Type 1: Eliminations des harmoniques 5,7

Sur la figure 2, l'angle de commutation  $\alpha_0$  varie en fonction de la variation de l'indice de modulation, tandis que l'angles  $\alpha_1$  reste constant. Les variations en valeurs relatives des harmoniques sectionnés sont représentées sur la figure 3. A première vue, ces résultats sont acceptables dans le cadre de l'optimum, et pour augmenter la convergence, nous avons introduit le critère du taux de distorsion harmonique comme fonction objective à minimiser. La figure 4 présente les résultats des valeurs relatives des harmoniques ciblés qui sont négligeables. Les angles de commutations obtenus satisfaisant les contraintes imposées sont  $\alpha_0 = 10.7^\circ$  et  $\alpha_1 = 88.51^\circ$ .

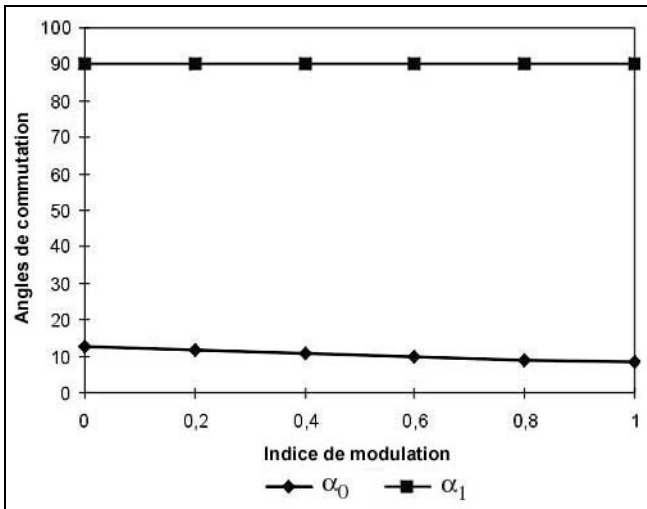


Figure 2: Angles de commutations sans le critère THD (C2, type1).

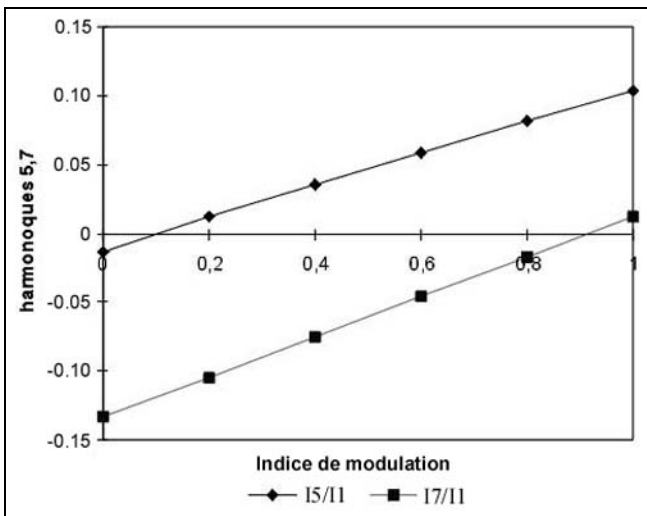


Figure 3: Harmoniques 5,7 sans le critère THD (C2, type1).

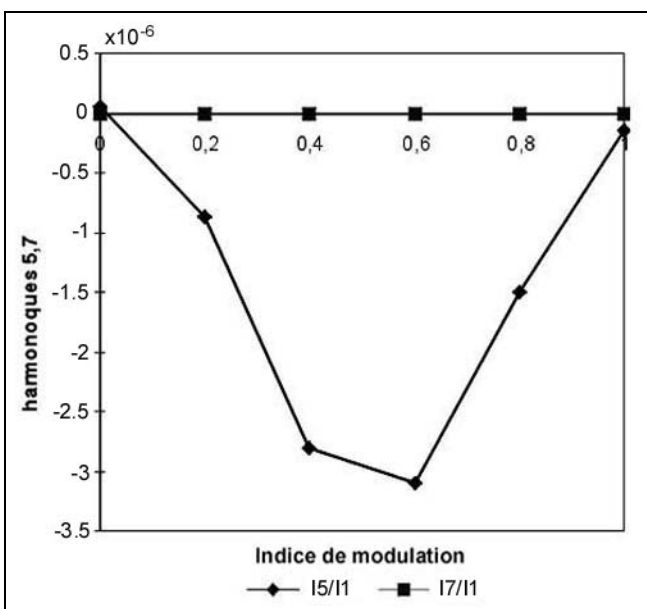


Figure 4: Harmoniques 5,7 avec le critère THD (C2, type1).

**Type 2: Elimination des harmoniques 5,7,11,13,17,19,23**

Les deux angles de commutations  $\alpha_0$  et  $\alpha_1$  représentés sur la figure 5 obtenus sans le critère de THD restent constants respectivement aux valeurs moyennes de  $4^\circ$  et  $89^\circ$ , l'angle  $\alpha_0$  représente presque 43% de l'angle du type 1. La figure 6 représente les variations en fonction de l'indice de modulation des valeurs relatives des amplitudes des harmoniques sans le critère de THD. En général, ces variations sont en-dessous des valeurs relatives pour un redresseur à commande classique avec le même point de fonctionnement. Les angles de commutation obtenus comme résultats vérifiant les contraintes imposées pour la deuxième étape d'optimisation, avec la même technique que l'étape du type 1, sont  $\alpha_0=4.59^\circ$  et  $\alpha_1=89.67^\circ$ .

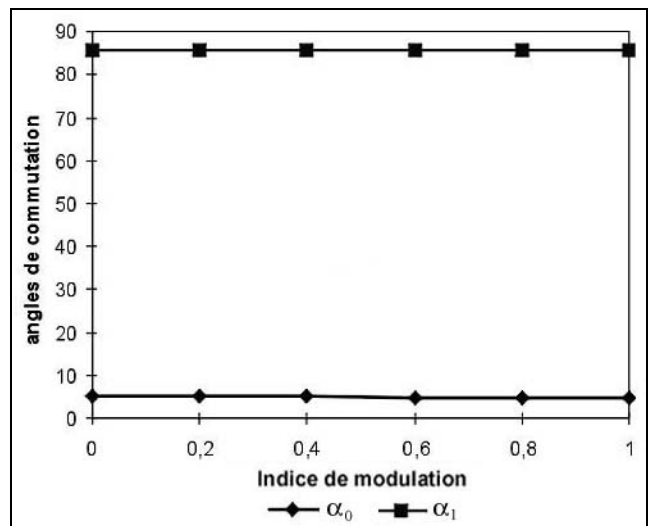


Figure 5: Angles de commutation sans le critère THD (C2, type 2).

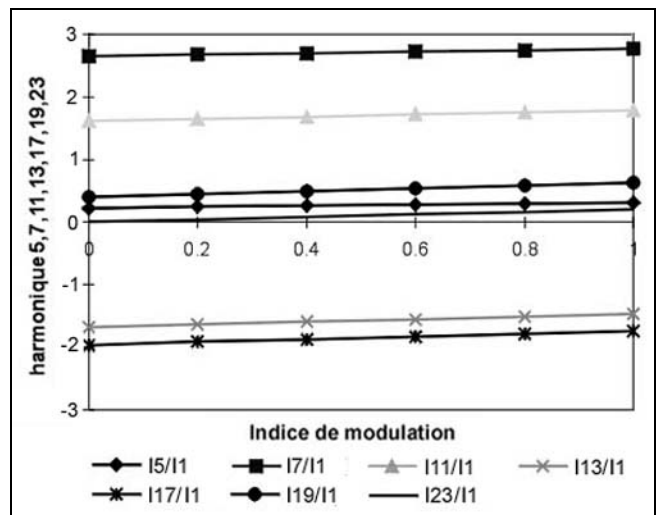


Figure 6: Harmoniques 5,7,11,13,17,19,23 sans le critère THD (C2, type 2).

**b- Onze commutations par quart de période (C11)**

**Type 2: Eliminations des harmoniques 5,7,11,13,17,19,23**

La figure 7 montre la variation des angles de commutation en fonction de l'indice de modulation sans le critère THD (La première optimisation). Les valeurs relatives

des amplitudes des harmoniques de la commande C11 sont nettement en dessous par rapport à la commande C2 (Fig. 8).

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 2.18^\circ & \alpha_1 &= 10.42^\circ & \alpha_2 &= 14^\circ & \alpha_3 &= 20.36^\circ \\ \alpha_4 &= 24.85^\circ & \alpha_5 &= 30.05^\circ & \alpha_6 &= 32.02^\circ & \alpha_7 &= 37.92^\circ \\ \alpha_8 &= 41.39^\circ & \alpha_9 &= 65.31^\circ & \alpha_{10} &= 68.74^\circ \end{aligned}$$

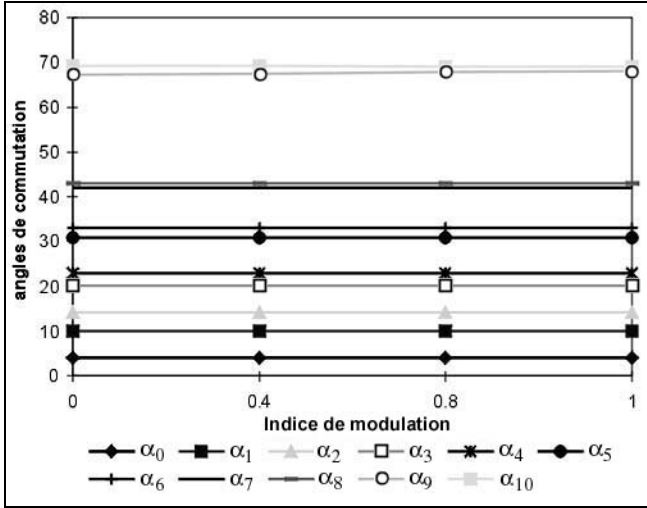


Figure 7: Angles de commutation sans le critère THD (C11, type 2).

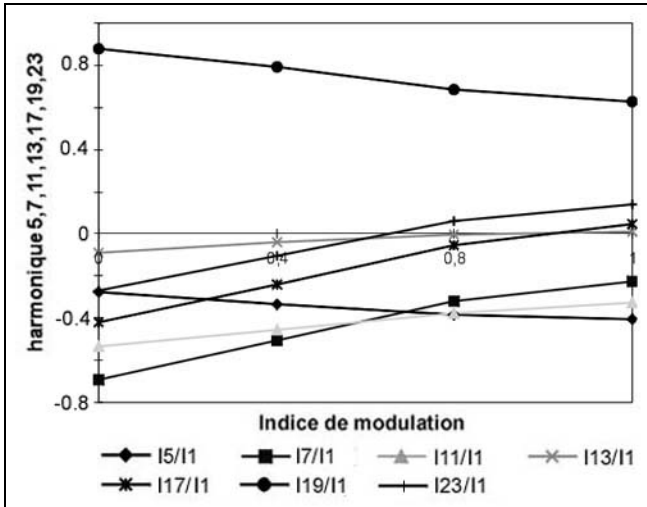


Figure 8: Harmoniques 5,7,11,13,17,19,23 sans le critère THD (C11, type 2).

## CONCLUSION

Dans le présent travail, nous avons procédé à l'optimisation des angles de commutations d'un convertisseur AC/DC. Nous avons introduit le taux de distorsion harmonique THD comme étant un deuxième critère d'optimisation. Les résultats obtenus (Fig.4), montrent l'efficacité de cette technique de commande. L'augmentation du nombre de commutations de C2 à C11 a permis l'amélioration du spectre résultant.

Le nombre d'harmoniques ciblé pour le même nombre de commutation par quart de période influe sur les valeurs des angles de commutations ( $\alpha_0=10.7^\circ$ ,  $\alpha_1=88.51^\circ$  pour l'élimination des harmoniques 5 et 7, et  $\alpha_0=4.59^\circ$ ,  $\alpha_1=89.67^\circ$  pour le type 2). Enfin, l'application de la MLI optimisée est tributaire de la fréquence de commutation des composants de puissance.

## REFERENCES

- [1]-Andrea Cavallini, Gian Carlo Montanari, "Compensation Strategies for Shunt Active-Filter Control", *IEEE Trans. on Power Elect.*, vol. 9, Nov. (1994).
- [2]-Ajay Maheshwari, Khai D.T. Ngo, "Synthesis of Six-Step Pulsewidth-Modulated Waveforms with Selective Harmonic Elimination", *IEEE Trans. on Power Elect.*, vol. 8, Oct. (1993).
- [3]-P. Meynaud, M. Lemoine, "Réseau de distribution flicker et harmoniques", *Technique de l'Ingénieur*, D648.
- [4]-Seyed Hossein Hosseini, "Les perturbation dans les réseaux alimentant des charges non-linéaires. Cas des dispositifs d'électroniques de puissances", Thèse de doctorat ingénieur, Nancy, 1981.
- [5]-Prasad N. Enjeti, Phoivos D. Ziogas, "Programmed PWM Techniques to Eliminate Harmonics; A critical Evaluation", *IEEE Tans. on Ind.*, Vol.26, N°2, March/April (1990), pp.302-316.
- [6]-Nonnon P., Escallier D., Saadate S., Le Doeuff R., "A Study of Bidirectionnal Active and Reactive Power Exchange and of the Harmonic Distortion in GTO Thyritor Rectifier", *Conférence IEE Londres*, Juillet (1990), pp.317-321. □