

TECHNIQUE D'ELIMINATION DES HARMONIQUES POUR ONDULEUR TRIPHASE

T. BAHI *
 NE. DEBBACHE *
 N. DOGHMANE **

Résumé

Cet article présente une technique d'élimination des harmoniques dite technique de modulation calculée appliquée à la commande des onduleurs triphasés de tension. La technique examinée permet, d'une part la minimisation des harmoniques, et d'autre part une nette augmentation du gain en tension de l'onduleur. La conséquence directe étant l'élargissement de la plage de variation de la fréquence de la tension et l'amélioration de la performance de l'association onduleur-charge. Le système d'équations régissant le fonctionnement imposé à l'onduleur est alors résolu par la méthode numérique de Newton-Raphson afin de déterminer les angles de commutation. Finalement, les résultats de simulation sont donnés pour deux cas de fonctionnement.

Mots clés : Modulation de Largeur d'Impulsion, onduleur de tension, modulation calculée, harmoniques.

1. Introduction

Les convertisseurs statiques gèrent l'énergie électrique dans les processus industriels de plus en plus variés et complexes. Aussi, leur structure se diversifie pour mieux satisfaire les exigences toujours plus poussées. L'étude des effets d'une onde en modulation de largeur d'impulsion (MLI) d'un onduleur de tension sur les performances d'une charge a montré qu'une onde en MLI de qualité doit être en mesure de minimiser les effets indésirables dus à la présence des harmoniques [1]. Aussi, pour améliorer les performances d'un onduleur de tension triphasé dont le schéma de principe est montré sur la figure 1, plusieurs techniques de modulation en largeur d'impulsion ont été développées. Ces techniques visent à éliminer ou bien à fixer un nombre d'harmoniques dans le but d'améliorer le rendement de l'association onduleur-charge.

Parmi ces techniques de modulation, nous pouvons citer la technique triangulo-sinusoïdale réalisée complètement en analogique. Cette technique possède aussi différentes versions numérisées qui sont plutôt connues sous le nom de techniques à échantillonnage régulier. Cependant, ces techniques ont montré leurs limites pour les faibles valeurs de l'indice de modulation et par leur principe même ne peuvent agir sur aucun critère de performance [2] [3]

Dans le présent article, nous présentons une autre approche de modulation optimale dite technique de modulation calculée ou d'élimination d'harmoniques.

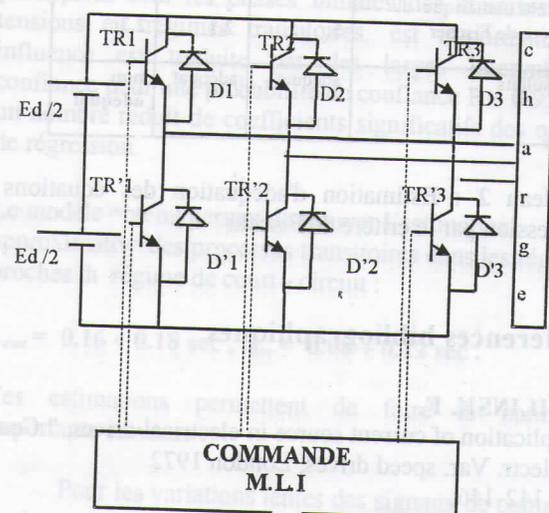


Fig 1. Schéma de principe de l'onduleur triphasé

2. Principe de la modulation calculée

Le schéma de la figure 2 représente la forme d'onde de sortie d'un onduleur de tension commandé en modulation de largeur d'impulsion. Cette technique consiste à former l'onde de la tension de sortie en une succession de créneaux de largeurs convenables sans tenir compte du calcul des angles de commutation.

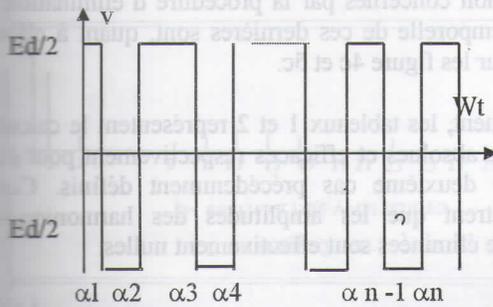


Figure 2 : Forme d'onde de sortie en MLI

Pour la technique de modulation calculée que nous mettons en œuvre dans ce papier, les angles de commutation (α_i) doivent être calculés de façon à éliminer certaines harmoniques nuisibles et indésirables pour le bon fonctionnement de l'assemblage onduleur-charge. Ces harmoniques sont généralement de faible ordre notamment les harmoniques 5, 7, 11, 13, 17.

Le train d'impulsions pour la commande des interrupteurs de l'onduleur peut être géré à partir d'un programme définissant les angles de commutation. Ceci découle alors, sur l'idée de confection d'une commande consistant à calculer au préalable les séquences de commutation de l'onduleur à partir des angles de commutation.

Le calcul des angles de commutation se fait selon un artifice mathématique bien connu. Le développement en série de Fourier de l'onde MLI représentée sur la figure 2 est :

$$v_n = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos Wt + B_n \sin Wt)$$

C'est une série trigonométrique dont les termes a_0 , A_n et B_n peuvent être calculés au moyen des formules de Fourier. Par ailleurs, on remarque que le signal étudié est impair, ce qui conduit à :

$$a_0 = A_n = 0$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V(a) \sin n \alpha d \alpha$$

En outre, suite à la symétrie du signal par rapport à $\pi/2$, les coefficients B_n sont nuls pour les harmoniques paires. Le calcul des coefficients B_n pour les harmoniques impaires se fait selon la relation suivante [5] :

$$B_n = \frac{4 E d}{2 n \alpha} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos n \alpha_k \right]$$

- avec $E d$ tension d'alimentation
- m nombre de commutation par quart de période.
- α_k $K^{i\text{ème}}$ angle de commutation

La méthode consiste à évaluer à zéro les $(n-1)$ équations des harmoniques et à attribuer au fondamental une valeur désirée. La technique de modulation calculée revient alors à résoudre un système d'équations dont le nombre d'équations dépend du nombre d'harmoniques à éliminer. Le système d'équations est non linéaire et admet plusieurs solutions. La solution recherchée doit vérifier les conditions suivantes :

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_n < \pi/2$$

La résolution du système d'équations est entreprise selon la méthode Newton-Raphson et concerne dans ce cas d'étude un système de n équations à n inconnus.

$$F(x) = F(x_0 + \Delta x) = F(x_0) + [j(x_0)] \Delta x = 0$$

où $j(x_0)$ représente la matrice Jacobienne du système en $x = x_0$

$$\Delta x = -[J(x_0)]^{-1} F(x_0)$$

$$\text{et } x_1 = x_0 - [J(x_0)]^{-1} F(x_0)$$

D'une manière générale :

$$x^{p+1} = x^p - [J(x^p)]^{-1} F(x^p)$$

Finalement, le schéma de la figure 3 montre l'organigramme du programme de simulation qui a permis d'aboutir aux résultats représentés dans le paragraphe suivants.

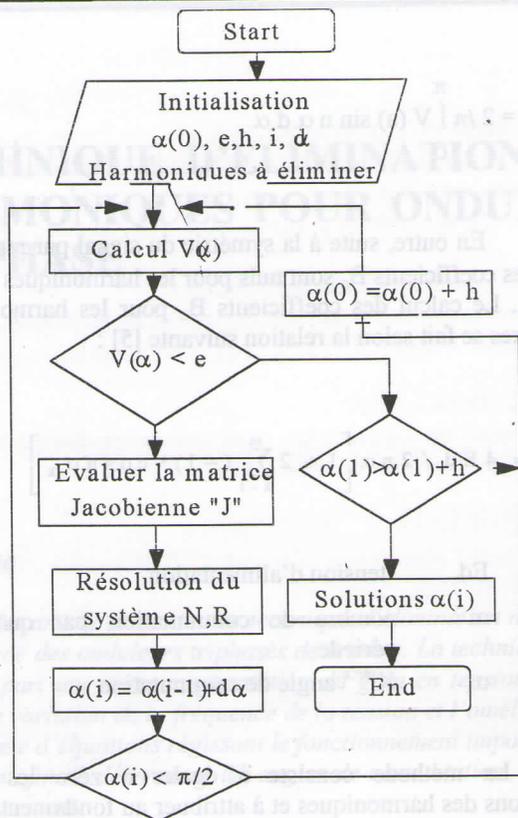


Figure 3 : organigramme de calcul

4. Résultats

Comme mentionné auparavant, la technique utilisée vise à résoudre un système d'équations dont le nombre dépend des harmoniques à éliminer. Cette résolution d'équations aboutit alors à la détermination des valeurs des angles de commutation de la tension de sortie de l'onduleur pour lesquelles ces harmoniques seront éliminées.

Aussi, nous présentons dans ce qui suit et à titre d'illustration de bon fonctionnement de la méthode de modulation calculée, les résultats de simulation pour deux cas seulement. Le premier cas vise à éliminer les harmoniques de rang 5 et 7 et le deuxième cas, à éliminer cinq harmoniques les plus indésirables de rang 5, 7, 11, 13 et 17. Les valeurs des angles de commutations calculés par le programme élaboré sont :

pour le premier cas :

$$\alpha_1 = 16.25^\circ$$

$$\alpha_2 = 22.063^\circ$$

pour le deuxième cas :

$$\alpha_1 = 6.795^\circ$$

$$\alpha_2 = 17.3^\circ$$

$$\alpha_3 = 21.025^\circ$$

$$\alpha_4 = 34.656^\circ$$

$$\alpha_5 = 34.984^\circ$$

Ces valeurs étant obtenues, la commande des transistors doit alors gérer la commutation de ces composants semi-conducteurs de façon que la tension de sortie de l'onduleur commute entre les valeurs $\pm E/2$ pour chaque quart de période.

Les formes d'onde des tensions de sortie obtenues par simulation sont représentées sur les schémas de la figure 4a pour le premier cas et la figure 5a pour le second.

Les figures 4b et 5b représentent le spectre des harmoniques non concernés par la procédure d'élimination. L'évolution temporelle de ces dernières sont, quant à elles représentées sur les figures 4c et 5c.

Finalement, les tableaux 1 et 2 représentent le calcul des amplitudes absolues et efficaces respectivement pour le premier et le deuxième cas précédemment définis. Ces tableaux montrent que les amplitudes des harmoniques destinées à être éliminées sont effectivement nulles.

Cas 1

Elimination des harmoniques 5 et 7

rang des harmoniques	valeurs absolues des harmoniques	valeurs efficaces des harmoniques
1	1.188	0.840
3	0.207	0.146
5	0.000	0.000
7	0.000	0.000
9	0.109	0.077
11	0.242	0.171
13	0.323	0.228
15	0.308	0.218
17	0.203	0.143
19	0.051	0.036
21	0.083	0.058
23	0.146	0.103
25	0.119	0.840
27	0.024	0.017
29	0.091	0.064
31	0.174	0.123

Cas 2

Elimination des harmoniques 5, 7, 11, 13 et 17

rang des harmoniques	valeurs absolues des harmoniques	valeurs efficaces des harmoniques
1	1.167	0.825
3	0.175	0.123
5	0.000	0.000
7	0.000	0.000
9	0.013	0.009
11	0.000	0.000
13	0.000	0.000
15	0.022	0.015
17	0.000	0.000
19	0.118	0.083
21	0.281	0.199
23	0.364	0.251
25	0.298	0.211
27	0.151	0.106
29	0.042	0.029
31	0.014	0.009

Figure 4 : cas des harmoniques 5 et 7

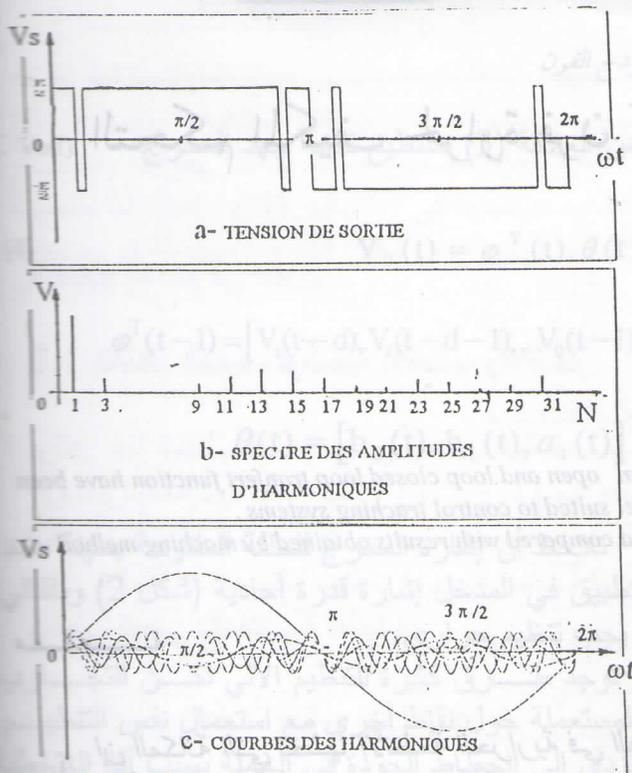


Figure 4 : cas des harmoniques 5 et 7

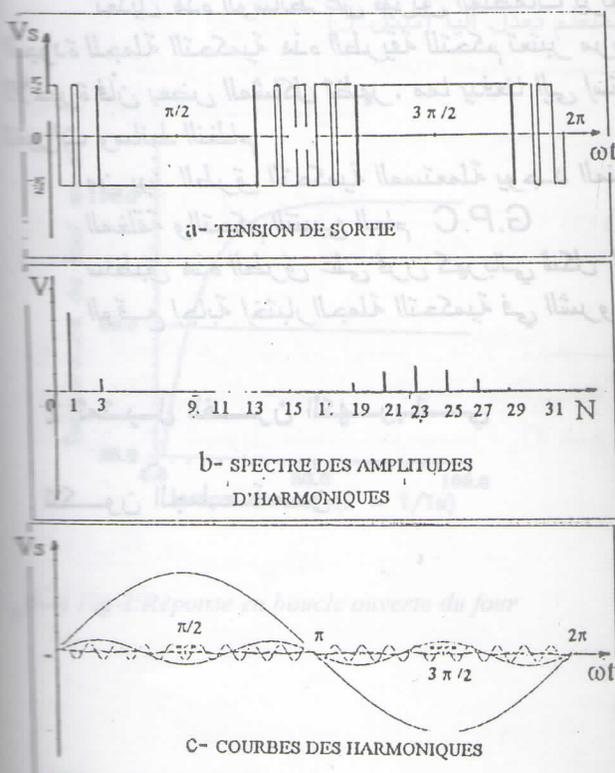


Figure 5 : cas des harmoniques 5, 7, 11, 13, 17

5. Conclusion

Ce travail a permis de mettre en évidence une technique d'élimination des harmoniques indésirables, dite -technique de modulation calculée. La simulation étant faite pour deux cas précis seulement pour justifier la démarche adoptée, mais peut être étendue à toute autre combinaison d'harmoniques à éliminer. Cette étape théorique étant validée, se pose alors le problème technique concernant la mise en œuvre des composants électroniques susceptibles de répondre efficacement en mode de commutation imposé.

Comparativement aux autres méthodes de modulation à largeur d'impulsions, cette technique montre une bonne performance et ce malgré un nombre réduit de commutations par quart de période. Les résultats obtenus confirment l'élimination effective des harmoniques dont les rangs ont été fixés préalablement.

Références bibliographiques.

- [1] M.A. Boost and P.D; Ziogas, « Statue of the art carrier PWM techniques : critical Evaluation ». IEEE trans .Ind .Appl., Vol.24, n°2, pp. 271 - 280, March / April 1988
- [2] N.BOUJERBA, H. CHEKIREB, « Comparaison des techniques M-L-I à échantillonnage régulier adaptées à l'onduleur de tension en pont alimentant un moteur asynchrone ». AJOT - 2nd C.E.A - NOV 29 - 30 / 1994 / Vol 1.
- [3] Y. AÏT- GOUGAM, A.NAFA, T. MORSLI, « Etude des techniques de modulation optimale pour onduleur de tension alimentant un moteur asynchrone ». AJOT - 2nd C.E.A - NOV 29 - 30 / 1994 / Vol 1
- [4] S.R. BOWES, A. MIDOUNE. « New PWM switching strategies for microprocesseur controlled inverterdrives ». IEE proceeding, Vol 133 Pt B N°4, July 1987.
- [5] M.S Pastel, R.G. Hoft, « Generalised techniques of harmonic Elimination and voltage control in thyristors investors ». IEEE transaction industry application N°3 May / June, Vol IA9.
- [6] J.P.NOUGIER, « Méthodes de calcul numériques », 3ème Edition révisée Masson, Paris 87.
- [7] K. SADEK, N.CRISTL, « Impact of system parameters on non-characteristic harmonics of H.V.D.C
- [8] AL. ZAHAWI, BA JONES, « Electrical characteristics of alternative recovery converters for slip recovery drives ». IEE Proc B Vol. 138 N°4, July 1991.

Institut d'Electrotechnique *
Institut d'Electronique -**