

Modélisation par réseaux de Petri de la commande à modulation sinusoïdale d'un convertisseur pont en H à quinze niveaux

O. Donfack Bidias ^{*}, L. Bitjocka, J. Song Manguelle [†] et A.O. Olorunfemi

Laboratoire, Energies, Signal, Imagerie et Automatique, LESIA
Université de Ngaoundéré, Cameroun

(reçu le 26 Mai 2018 - accepté le 30 Juin 2018)

Résumé - Les convertisseurs multi niveaux sont utilisés dans des applications industrielles de forte puissance car, elles permettent de réduire de manière considérable les harmoniques de courant et de tension qui sont néfastes pour les machines électriques. Compte tenu de la complexité de la commande des convertisseurs multi niveaux, nous proposons dans cet article une méthodologie de modélisation par le Réseau de Petri qui vise à faciliter l'implémentation de cette commande sur un convertisseur Pont en H à 15 niveaux. Dans cette étude, nous effectuerons des analyses comparatives des Taux de Distorsion d'Harmoniques (TDH) et des valeurs des tensions de sortie entre les stratégies de commande par Modulation à Largeur d'Impulsion Sinusoïdale (MLI-S) et de commande à Composante Homopolaire (MLI-CH). Le logiciel Matlab/Simulink est utilisé pour la simulation des différentes techniques de commande (PD, POD, APOD) du convertisseur.

Abstract - Multilevel converters are used in high power industrial applications. They make it possible to considerably reduce the current and voltage harmonics that are harmful for electrical machines. Given the complexity of the multilevel converter control, we propose in this paper a modeling methodology by the Petri Net which aims to facilitate the implementation of this command on a 15-level H-Bridge converter. In this study, we will perform comparative analyzes of Harmonic Distortion Rates (TDH) and output voltage values between control strategies by Sine Pulse Width Modulation (PWM-S) and Homopolar Component Control, (MLI-CH). The Matlab / Simulink software is used to simulate the various control techniques (PD, POD, APOD) of the converter.

Mots clés: Convertisseur Pont en H - Modulation à Largeur d'Impulsion - Réseaux de Petri - Taux de Distorsion d'Harmonique (TDH).

1. INTRODUCTION

L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est devenue un champ extrêmement vaste, car les équipements industriels utilisent de plus en plus des machines à vitesse variable.

L'inconvénient majeur des convertisseurs statiques à deux niveaux de tension de sortie est caractérisé, par une dégradation du régime de fonctionnement de certaines charges. Ces tensions de sortie sont très riches en harmoniques, d'où la nécessité de les réduire. Outre cela les convertisseurs statiques à deux niveaux sont limités aux applications de faibles et de moyennes puissances.

Dans les applications de fortes puissances, la structure à plusieurs niveaux est plus adaptée, du fait que les tensions et les courants de sortie présentent un taux de distorsion harmonique nettement inférieur.

L'utilisation des techniques de modulation comme stratégie de commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs réduit considérablement les

^{*} omerbidi@yahoo.fr - lbitjoka@yahoo.com

[†] Joseph.m.song@exxonmobil.com - jojo@tntech.edu

harmoniques. La modulation par hystérésis est souvent utilisable et très simple mais sa fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable.

La modulation sinusoïdale semble la meilleure technique de commande de l'ouverture et la fermeture des interrupteurs mais elle devient complexe lorsque le nombre de niveaux de la tension de sortie du convertisseur devient important [Mariéthoz et al., 2005]. Pour faire face à ces multiples difficultés, diverses études ont été effectuées.

[Talha, 2004] effectue une analyse fonctionnelle réalisée au moyen du formalisme de Petri qui consiste à dénombrer les configurations physiquement réalisables, à attribuer à chacune d'entre elles un modèle électrique équivalent et à définir les conditions de changement de configuration. [Alla et al., 2006] étudient une modélisation par Réseaux de Petri d'un convertisseur DC-DC (Hacheur) en vue de déterminer les conditions de conduction.

[Batschauer et al., 2012] ont proposé un onduleur multi niveau hybride triphasé basé sur des modules en demi ponts. [Yousefpoor et al., 2012] ont introduit la minimisation TDH appliquée directement sur la tension ligne-ligne des convertisseurs multi niveaux.

[Josh et al., 2011] ont déclaré que l'amélioration de la qualité de l'énergie peut être obtenue en réduisant les harmoniques à la tension de sortie du convertisseur. [Cougo et al., 2012] ont analysé et trouver que la méthode de disposition de phase (PD) est la meilleure méthode pour réduire le déséquilibre actuel dans l'onduleur multi niveau. [Barreto et al., 2012] ont étudié la modulation PWM à base de porteuses pour la réduction du TDH et les pertes dans les inverseurs multi niveaux.

Dans toutes les topologies de convertisseurs multi niveaux existantes, plus ce nombre de niveau est élevé, plus compliquée devient la structure du convertisseur. Son coût et la complexité de sa commande s'en trouve augmentés, et sa fiabilité s'en trouve réduite [Song-Manguelle et al., 2003]. Pour faire face aux difficultés liées à la commande des convertisseurs Pont en H à N-niveaux de tension, nous proposons dans cet article une modélisation par RdP de la Modulation à Largeur d'Impulsion Sinusoïdale (MLI-S). Par la suite nous effectuons une étude comparative des THD et des tensions de sortie en fonction des différentes techniques de commande

2. CONVERTISSEUR PONT EN H

Ce convertisseur est basé sur l'utilisation de modules élémentaires identiques connectés en série ou en parallèle. Chaque module comprend une source de tension continue et des interrupteurs, qui, associés à une commande adaptée, permettent de « by passer » ou mettre en conduction la source de tension.

Dans le cas présent, le module utilisé est un pont en H équivalent à un convertisseur 2-niveaux triphasé auquel une phase a été supprimée. Chaque module comprend donc quatre interrupteurs et un bus DC.

Pour obtenir une tension multi niveaux, ces modules sont connectés en cascade (figure 1). Dans ce cas, la tension résultante aux bornes de la charge est la somme algébrique de la tension de sortie de chaque module, ce qui permet à la fois d'augmenter le nombre de niveaux et d'améliorer la qualité de la tension de sortie.

Les figures ci-dessous représentent trois modules ponts en H en cascade ainsi que l'allure temporelle de la tension résultante (V_{ab}). Cet assemblage représente un bras de convertisseur et une multitude de configurations de ces bras peuvent être envisagées.

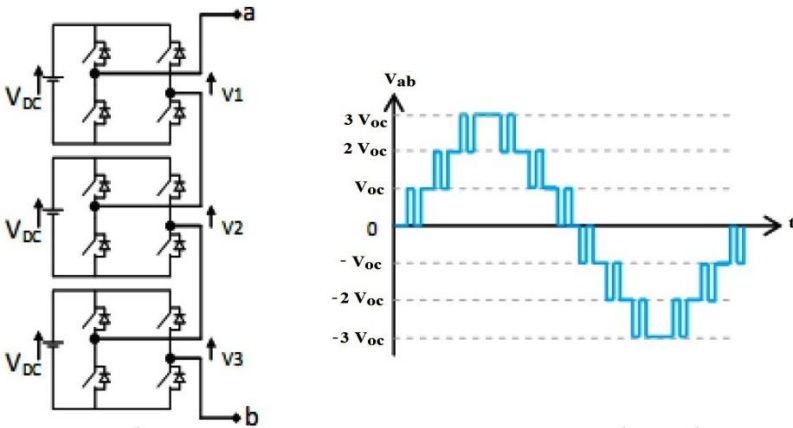


Fig. 1: Trois ponts en H en Cascade

Les sources de tension continues peuvent être de natures différentes (batterie, tension isolée alimentée par un redresseur, cellule photovoltaïque, capacité, etc.) et les niveaux de tension d'un module à l'autre ne sont pas forcément identiques. Dans le cas où les sources de tension sont à base de capacités flottantes, l'équilibrage des bus DC est réalisé par une commande adaptée pour assurer la stabilité du convertisseur [Lizana *et al.*, 2012].

3. METHODOLOGIE

3.1 Modulation à large d'impulsion sinusoïdale (pleine onde)

Cette stratégie de modulation utilise plusieurs porteuses triangulaires disposées les unes au-dessus des autres et comparées à la même tension de référence. Chaque porteuse est assignée à un niveau de tension et l'intersection avec la modulante provoque la génération des ordres de commande des interrupteurs du niveau correspondant [Morati, 2014].

Elles peuvent être disposées en Phase (PD-PWM, (a)), en Opposition de Phase (POD-PWM, (b)) ou en Opposition de Phase Alternée (APOD-PWM, (c)).

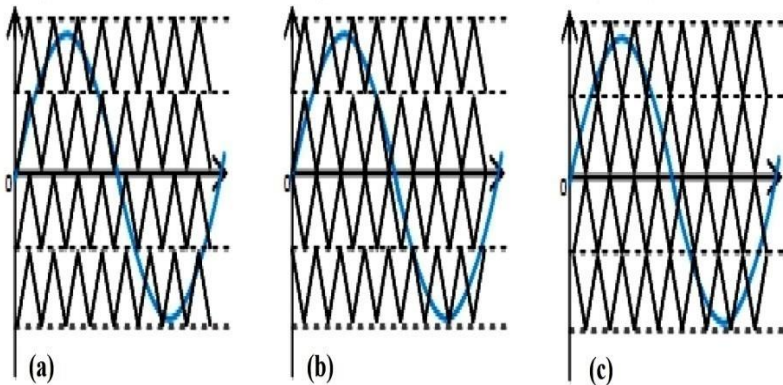


Fig. 2: Dispositions de commande à porteuse triangulaire

Caractéristiques de la modulation sinusoïdale

En général, un convertisseur à N-niveau de tension nécessite (N-1) porteuses triangulaires. Toutes les porteuses triangulaires ont la même fréquence et la même amplitude.

- L'indice de modulation en fréquence-

$$A_f = f_c / f_m$$

avec, f_c , fréquence de la porteuse (signal triangulaire); f_m , fréquence de la modulante (signal sinusoïdal).

- Coefficient de réglage d'amplitude-

$$A_p = A_m / A_c (m - 1) \quad \text{pour } 0 \leq A_p \leq 1$$

avec, A_c , amplitude de la porteuse; A_m , amplitude de la modulante.

3.2 Modélisation par réseaux de Petri [David et al., 1992]

Les systèmes dynamiques sont généralement continus et/ou discrets à l'exemple des convertisseurs statiques. L'outil de modélisation approprié pour évaluer ses grandeurs physiques (courant, tension) et faciliter les ordres de commandes des interrupteurs est le Réseau de Petri Hybride. Le RdPA est un 5-Uplet défini par:

$$R = (P, T, \text{Pré}, \text{Post}, M_0) \quad \text{tel que -}$$

P et T sont, respectivement, des ensembles finis et non vides de places de transitions, tel que,

$$P \cap T = \Phi$$

Pré est l'application indicielle avant, tel que-

$$\text{Pré} : P \times T \rightarrow \mathbb{N} \quad \text{si } h(P) = D \quad \text{et} \quad \text{Pré} : P \times T \rightarrow \mathbb{R}^+$$

Post est l'application d'incidence arrière, telle que-

$$\text{Post} : P \times T \rightarrow \mathbb{N} \quad \text{si } h(P) = D \quad \text{et} \quad \text{Post} : P \times T \rightarrow \mathbb{R}^+$$

M_0 est le marquage

La matrice d'incidence associée à un RdP

$$W_{ij} = \text{Post}(P_i, T_j) - \text{Pré}(P_i, T_j)$$

3.3 Modélisation par RdP de la commande d'un bras du convertisseur Pont en H à 15 niveaux

Cette modélisation s'effectue en quatre (04) principales étapes.

Etape 1- Détermination des tensions de références et des porteuses triangulaires

Les tensions de référence triphasées, ont pour expression:

$$\begin{cases} V_{\text{ref}1} = V_1 \sin \omega t \\ V_{\text{ref}2} = V_2 \sin (\omega t - \varphi - 2/3\pi) \\ V_{\text{ref}3} = V_3 \sin (\omega t - \varphi - 4/3\pi) \end{cases}$$

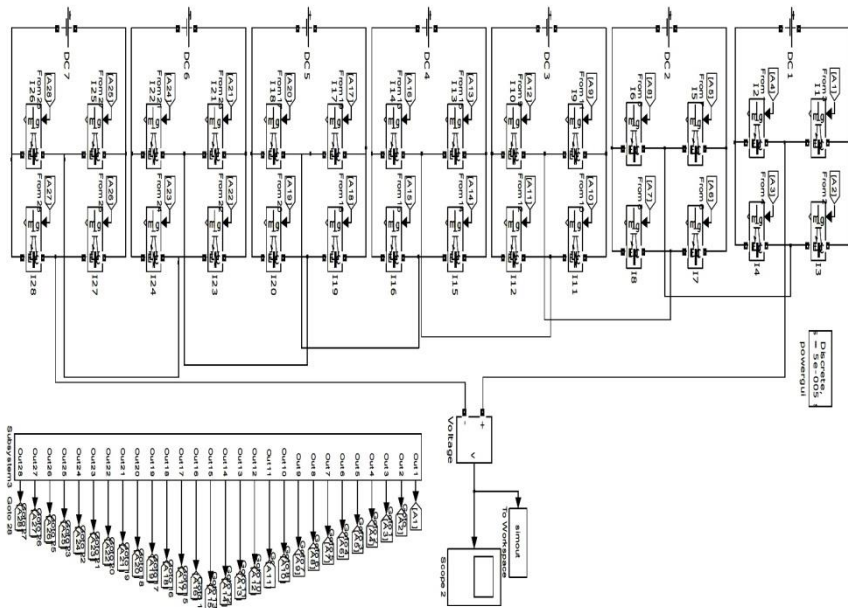


Fig. 3: Bras d'un convertisseur Pont en H à 15 niveaux

Celles des quatorze porteuses triangulaires-

$$\left\{ \begin{array}{ll} U_{p1}(t) = U_{C1}(t/T_p + 1) & \text{avec } U_{p8} = \overline{U_{p1}} \\ U_{p2}(t) = U_{C2}(t/T_p - 1) & \text{avec } U_{p9} = \overline{U_{p2}} \\ U_{p3}(t) = U_{C3}(3t/T_p + 1) & \text{avec } U_{p10} = \overline{U_{p3}} \\ U_{p4}(t) = U_{C4}(3t/T_p - 1) & \text{avec } U_{p11} = \overline{U_{p4}} \\ U_{p5}(t) = U_{C5}(5t/T_p + 1) & \text{avec } U_{p12} = \overline{U_{p5}} \\ U_{p6}(t) = U_{C6}(5t/T_p - 1) & \text{avec } U_{p13} = \overline{U_{p6}} \\ U_{p7}(t) = U_{C7}(7t/T_p + 1) & \text{avec } U_{p14} = \overline{U_{p7}} \end{array} \right.$$

T_p étant la période de signal de la porteuse triangulaire et C_i des tensions d'alimentation continue de chaque module du pont en H.

Etape 2- Détermination des niveaux de tension intermédiaire du convertisseur (V_s)

Les tensions intermédiaires V_s d'un bras K du convertisseur Pont en H à 15 niveaux sont obtenus après comparaison entre le signal de référence et les signaux des différentes porteuses triangulaires. Les expressions de comparaison entre les deux signaux sont données ci dessus.

Comparaison des signaux de commande-

$$\text{Si } \left\{ \begin{array}{ll} V_{ref1} < U_{pi} & \text{alors } I_G \rightarrow 0 \\ V_{ref1} < U_{pi} & \text{alors } I_G \rightarrow 1 \end{array} \right. \quad I_G \text{ Impulsion de gchette (valeur binaire)}$$

Et le résultat issu de cette comparaison est présenté ci-dessous.

$V_{ref1} \geq U_{P7}$	alors	$V_S = 7U_C$	$V_{ref1} \geq U_{P8}$	alors	$V_S = 0U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P7}$	alors	$V_S = 6U_C$	$V_{ref1} \leq U_{P8}$	alors	$V_S = -1U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P6}$	alors	$V_S = 6U_C$	$V_{ref1} \geq U_{P9}$	alors	$V_S = -1U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P6}$	alors	$V_S = 5U_C$	$V_{ref1} \leq U_{P9}$	alors	$V_S = -2U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P5}$	alors	$V_S = 5U_C$	$V_{ref1} \geq U_{P10}$	alors	$V_S = -2U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P5}$	alors	$V_S = 4U_C$	$V_{ref1} \leq U_{P10}$	alors	$V_S = -3U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P4}$	alors	$V_S = 4U_C$	$V_{ref1} \geq U_{P11}$	alors	$V_S = -3U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P4}$	alors	$V_S = 3U_C$	$V_{ref1} \leq U_{P11}$	alors	$V_S = -4U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P3}$	alors	$V_S = 3U_C$	$V_{ref1} \geq U_{P12}$	alors	$V_S = -4U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P3}$	alors	$V_S = 2U_C$	$V_{ref1} \leq U_{P12}$	alors	$V_S = -5U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P2}$	alors	$V_S = 2U_C$	$V_{ref1} \geq U_{P13}$	alors	$V_S = -5U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P2}$	alors	$V_S = 1U_C$	$V_{ref1} \leq U_{P13}$	alors	$V_S = -6U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P1}$	alors	$V_S = 1U_C$	$V_{ref1} \geq U_{P14}$	alors	$V_S = -6U_C$
$V_{ref1} \geq U_{P1}$	alors	$V_S = 0U_C$	$V_{ref1} \leq U_{P14}$	alors	$V_S = -7U_C$

Etape 3- Modèle RdP équivalent

Le nombre de place P du modèle RdP d'un convertisseur pont en H est égal à N (nombre de niveaux de la tension de sortie V_S). Il a pour expression $N = 2m+1$, m étant le nombre de module du convertisseur. Pour un convertisseur à 7 modules, nous obtenons un RdP de 15 places.

Sachant qu'un module possède quatre interrupteurs commandables, alors le nombre de transitions est $T = 4m$, soit 28 transitions.

- Tension de sortie V_S

Compte tenu de la complexité de cette analyse, afin de la faciliter, nous proposons en ci-dessous le modèle RdP qui permet d'identifier les états des différents niveaux de tension.

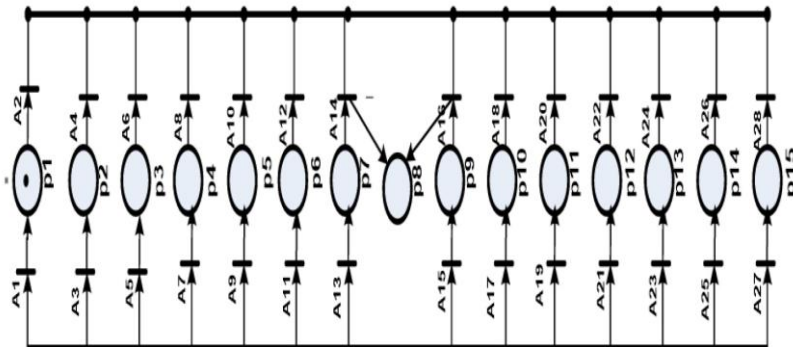


Fig. 4: Modèle d'un bras du convertisseur pont en H à 15 Niveau

Pour l'obtention de la tension de sortie $V_S = 7U_C$, alors il faudrait que les interrupteurs $I_1, I_4, I_5, I_8, I_9, I_{12}, I_{13}, I_{16}, I_{17}, I_{20}, I_{21}, I_{24}, I_{25}, I_{28}$ soient actifs.

Etape 4- Détermination de la matrice de commande

La matrice M de la commande du convertisseur Pont en H à 15 niveaux issue du modèle RdP est la suivante.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	7V
2	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	6V
3	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	5V
4	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	4V
5	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	3V
6	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	2V
7	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1V
8	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0V
9	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	-1V
10	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	-2V
11	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	-3V
12	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	-4V
13	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	-5V
14	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	-6V
15	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	-7V

- Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Tension continue V_d (symétrique)	100 V
Fréquences de référence	50 Hz
Fréquence des porteuses	1000 Hz
Indice de modulation	0.9

4. RESULTATS

Les résultats ci-dessous sont obtenus à l'aide du logiciel de simulation Matalb/Simulink. Nous présentons les valeurs de taux de distorsion d'harmonique (TDH) et les tensions de sortie V_s issues d'une part, des commandes PD, POD, et APOD de la Modulation à Largeur d'Impulsion Sinusoïdale (MLI-S) et d'autre part de la Modulation à Largeur d'Impulsion à Composante Homopolaire (MLI-CH).

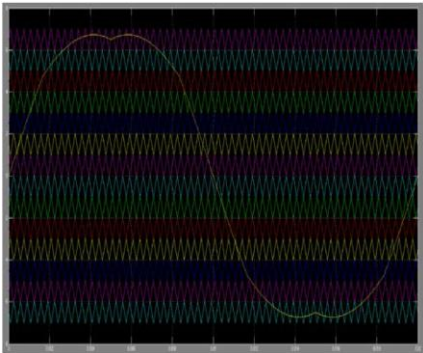


Fig. 6: Stratégie de la commande APOD-(MLI-S)

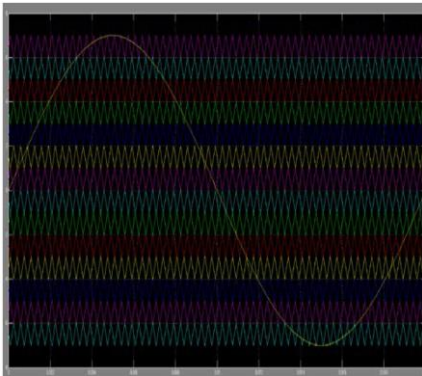


Fig. 7: Stratégie de la commande APOD-(MLI-CH)

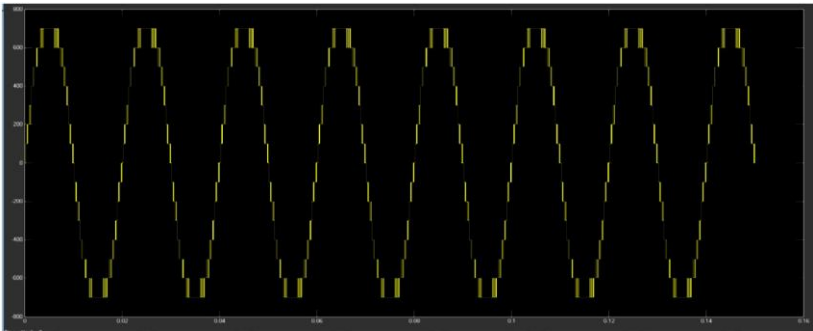


Fig. 8: Signal de la tension de sortie du convertisseur pont en H à 15 niveaux

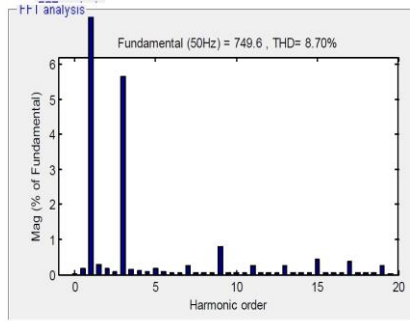
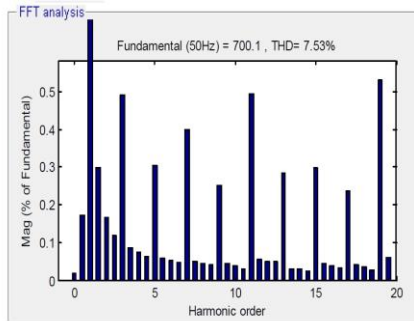
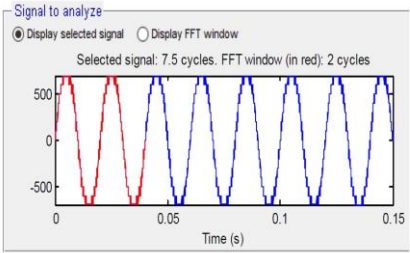
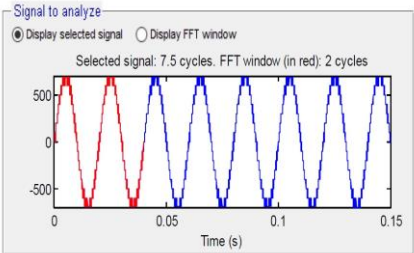


Fig. 9: TDH et tension de sortie (APOD-MLI-S)

Fig. 10: TDH et tension de sortie (APOD-MLI-CH)

Les tableaux ci-dessous nous présentent les valeurs exactes des TDH et des tensions de sortie des modulations à largeur d'impulsion sinusoïdale et à composante homopolaire.

Convertisseurs	Pont en H à 15 niveaux			Convertisseurs	Pont en H à 15 niveaux		
MLI-CH	PD	POD	APOD	MLI-S	PD	POD	APOD
TDH (%)	8.72	8.80	8.70	TDH (%)	7.51	7.52	7.53
Tension V_s	749.6	740.6	749.6	Tension V_s	700	700	700

Discussion- Au vu de la méthodologie de modélisation par RdP de la commande par modulation à largeur d'impulsion sinusoïdale, nous constatons que le modèle RdP nous

donne une matrice d'incidence utile pour la commande des convertisseurs pont en H à un quelconque niveau de tension.

En ce qui concerne le convertisseur pont en H à 15 niveaux, nous avons fait une étude comparative entre la modulation à largeur d'impulsion sinusoïdale et celle à composante homopolaire. De cette étude, nous observons que les TDH de la commande à MLI-S sont inférieurs à ceux de la commande MLI-CH.

Ceci s'explique par le fait que l'amplitude du signal de référence de la composante sinusoïdale est supérieure à celle des plus grandes composantes triangulaires. De cette analyse nous pouvons affirmer que la stratégie de commande APOD est celle qui permet d'obtenir un faible THD.

Pour ce qui des valeurs de tension de sortie, nous observons d'après les résultats présentés aux tableaux ci-dessus, que les tensions de sortie issues de la commande à MLI-S restent constantes pour différente stratégie soit 700V. Il est à remarquer les tensions de sortie issues de la commande à MLI-CH, sont supérieures à ceux de la commande à MLI-S.

Pour un meilleur compromis entre les deux types de commande, il est plus judicieux d'effectuer pour opter avec la technique de commande APOD à composante homopolaire (TDH = 8.70% et V_s 749.6V).

5. CONCLUSION

Cette étude nous montre effectivement que plus le niveau de tension du convertisseur est élevé, plus son THD est réduit. La modélisation par RdP de la commande par modulation sinusoïdale nous a permis d'établir méthodologie applicable sur le convertisseur pont en H à N-niveaux de tension.

A l'observation des résultats obtenus issus de l'étude par comparaison entre la stratégie MLI-S et MLI-CH, nous pouvons affirmer que la technique de commande APOD de la stratégie MLI-CH offre un meilleur TDH= 8.70 % et une tension de sortie $V_s = 749.6$ V. Pour la suite de notre étude il est judicieux d'effectuer une étude sur le convertisseur Hybride-Pont en H ceci dans le but de déterminer le convertisseur le plus approprié.

REFERENCES

- [Talha, 2004] A. Talha, E. Berkouk and M. Boucherit, '*Control of a Resistively-Half Clamped Seven-Level NPC VSI Cascade fed by Six Two - Level PWM Rectifiers*', MS'2004, pp. 5.25 - 5.28, Lyon, France 2004.
- [Mariéthoz *et al.*, 2005] S. Mariéthoz and A. Rufer, '*A New Single-Phase Multilevel Modulator-A Fast and Accurate Method to Compute the Modulator Harmonic Spectra*', EPE- PEMC'04 Conference, September 2004.
- [Alla *et al.*, 2006] H. Alla and B. Said, '*Modelling by Petri Nets of the Hybrid Systems*', In Electrical Engineering, Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Systems Theory & Scientific Computation, El Ounda, Greece, August 21-23, pp. 151 - 156, 2006.
- [Yousefpoor *et al.*, 2012] N. Yousefpoor, S.H. Fathi, N. Farokhnia and H.A. Abyaneh, '*THD Minimization Applied Directly on the Line-to-Line Voltage of Multilevel Inverters*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, N°1, pp. 373 - 380, Jan. 2012.

- [Batschauer et al., 2012] A.L. Batschauer, S.A. Mussa and M.L. Heldwein, '*Three-Phase Hybrid Multilevel Inverter Based on Half-Bridge Modules*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, N°2, pp. 668 - 678, Feb. 2012.
- [Cougo et al., 2012] B. Cougo, G. Gateau, T. Meynard, M. Bobrowska-Rafal and M. Cousineau, '*PD Modulation Scheme for Three-Phase Parallel Multilevel Inverters*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, N°2, pp. 690 - 700, Feb. 2012.
- [Barreto et al., 2012] L. Barreto, G. Henn, P. Praca, R. Silva, D. Oliveira, and E. da Silva, '*Carrier-Based PWM Modulation for THD and Losses Reduction on Multilevel Inverters*', in Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC, Twenty-Seventh Annual IEEE, pp. 2436 - 2441, 2012.
- [Josh et al., 2011] P.T. Josh and J. Jerome, '*The Comparative Analysis of Multicarrier Control Techniques For SPWM Controlled Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter*', Proceedings of ICETECT, pp. 459 - 466, 2011.
- [Lizana et al., 2012] R.F. Lizana, M.A. Perez and J. Rodriguez, '*DC Voltage Balance Control in a Modular Multilevel Cascaded Converter*', , 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE, pp.1973 - 1978, 28 - 31 May 2012.
- [Morati, 2014], Thèse de Doctorat '*Contribution à l'Etude et au Contrôle des Convertisseurs Multi niveaux: Application à la Compensation des Fours à Arc*', Juin 2014.
- [Song-Manguelle et al., 2003] Song-Manguelle and A. Rufer, '*Multilevel Inverter for Power System Applications: Highlight Inga Symmetric Design Effects Forma Supply Net-Work Point of View*', IEEE Canadian Conference on Electronics and Computer Engineering, pp. 435 - 440, Montreal, Canada, 4-7 May2003, 2003.