

## Etude comparative des convertisseurs statiques modélisés par les réseaux de Pétri

O. Donfack Bidias<sup>\*</sup>, L. Bitjoka, M. Song<sup>†</sup> et O. Olurunfemi

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

(reçu le 20 juin 2018 - accepté le 20 Septembre 2018)

**Résumé** - *Cet article vise à faire la présentation d'une étude comparative sur les différentes topologies usuelles des convertisseurs multi niveaux. Compte tenu de la forte présence des harmoniques de tension et de courant qui sont néfastes pour le bon fonctionnement des machines électriques. Il nous semble important d'effectuer une analyse des différentes stratégies de commande des interrupteurs de commutation à l'aide de la modulation sinusoïdale à largeur d'impulsion. Vue la complexité de l'analyse de fonctionnement des convertisseurs de puissance, nous effectuerons une modélisation de ces derniers par les Réseaux de Petri autonomes, ceci pour une facilitation de la commande des interrupteurs (partie discrète). Dans cette communication, nous présenterons la problématique de recherche, l'objectif visé, la méthodologie et nous terminerons par une discussion des résultats obtenus à l'aide du logiciel de simulation Matlab.*

**Abstract** - *This article aims to present a comparative study on the different topologies commonly used in multi-level converters. Considering the high presence of voltage and current harmonics that are harmful to the proper functioning of electrical machines. It seems important to us to carry out an analysis of the different control strategies of switching switches using pulse width sinusoidal modulation. Given the complexity of the analysis of the functioning of the power converters, we will carry out a modeling of the latter by the autonomous Petri Networks, this for a facilitation of the control of the switches (discrete part). In this paper, we will present the research problem, the objective, the methodology and we will end with a discussion of the results obtained using the Matlab simulation software.*

**Mots clés:** Convertisseurs multi niveaux - Modulation à largeur d'impulsion - Taux de distorsion d'harmonique - Réseaux de Petri.

### 1. INTRODUCTION

Les convertisseurs statiques jouent le rôle d'interface entre une source d'énergie électrique et une charge. Constitués d'interrupteurs de puissance, ses caractéristiques de base ne dépendent de quelque façon que ce soit, ni de ces sources, ni du type d'interrupteurs utilisés, ni des applications dans lesquelles ils sont utilisés, ni même de sa topologie. C'est une matrice d'interrupteurs réalisant la connexion de ses nœuds d'entrée à ses nœuds de sortie, permettant ainsi d'y contrôler le transfert d'énergie [Song-Manguelle *et al.*, 2000].

Généralement, les convertisseurs à deux niveaux de tension permettent de transiter la puissance au réseau électrique par le biais du courant car, la tension de sortie de ces convertisseurs est limitée par la tension de blocage de ses composants à semi-conducteurs. L'une des solutions pour augmenter la puissance transitée par les convertisseurs est d'augmenter la tension en limitant les courants et réduire ainsi les pertes [Ahmidi, 2010].

---

<sup>\*</sup> omerbidi@yahoo.fr - lbitjoka@yahoo.com

<sup>†</sup> jseph.m.song@exxonmobil.com - jojo@tntech.edu

C'est pour cela que les convertisseurs multi niveaux asymétriques de moyenne et haute tension suscitent une attention croissante car, ils sont capables de réduire les harmoniques de tension [Amghar et al., 2013].

Cet article se présente en deux grandes parties. La première partie vise à faire une étude comparative des convertisseurs multi niveaux usuels, les différentes techniques de commandes par modulation à largeur d'impulsion, et l'outil Réseaux de Pétri Autonomes utilisé pour la modélisation de la commande des convertisseurs statiques. La seconde partie nous présente la méthodologie de recherche et la discussion des résultats obtenus.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1 Matériel

Pour atteindre nos objectifs, nous aurons besoin comme matériel, les différentes topologies des convertisseurs multi niveaux, comme outils de modélisation nous utiliserons les Réseaux de Pétri, et le logiciel de simulation Matlab.

**Problématique-** Détermination d'une commande par modulation à largeur d'impulsion appropriée pour un type de convertisseurs multi niveaux, en vue de réduire les harmoniques de tension.

**Objectifs-** Evaluer en fonction des différentes techniques de modulation, les taux de distorsion d'harmonique des topologies de convertisseurs à plusieurs niveaux.

#### 2.1.1 Les convertisseurs multi niveaux

Les quatre (04) principales topologies de convertisseurs multi niveaux les plus utilisées sont présentées ci-dessous:

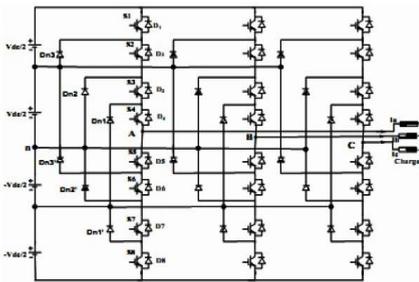


Fig. 1: Convertisseur NPC à cinq niveaux [Yazdani et al., 2006]

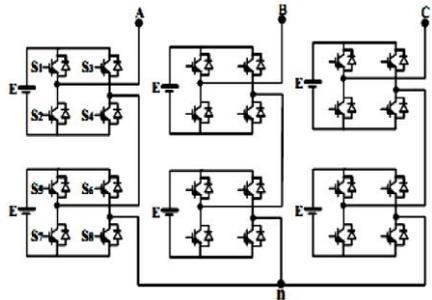


Fig. 2: Convertisseur Pont en H à cinq niveaux [Mirecki, 2005]

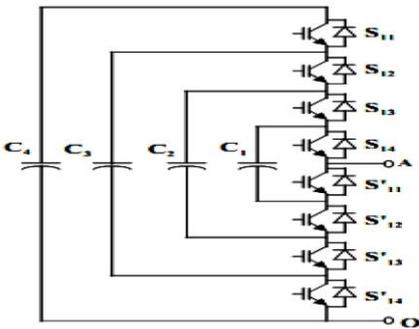


Fig. 3: Convertisseur Hybride NPC-Pont en H [ZhengPeng et al., 2002]

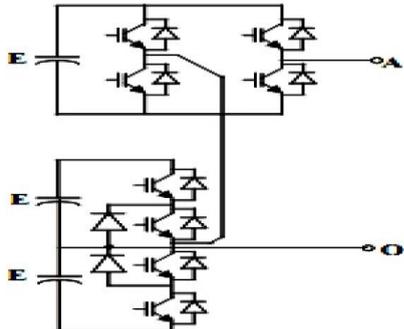


Fig. 4: Convertisseur multi niveau à cellules imbriquées [Meynard et al., 1993]

**Tableau 1:** Tableau comparatif des convertisseurs multi niveaux

Convertisseur	Avantages	Inconvénients
<b>Deux niveaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilite la réalisation du disposition de commande.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brusque changement de la tension occasionnant des tensions de mode commun aux bornes de la machine.</li> <li>- Existence des harmoniques prohibitifs pour le système.</li> </ul>
<b>NPC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique;</li> <li>- Configuré de façon à obtenir un nombre élevé de niveaux, permettant de réduire la tension bloquée par chaque interrupteur;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs lors de leur mise en série;</li> <li>- Inégalité des tensions inverses supportées par les diodes.</li> </ul>
<b>Pont en H</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La modularité de sa structure permet facilement son extension à un nombre élevé de cellules sur chaque phase,</li> <li>- Equilibrage naturel des tensions est réalisé,</li> <li>- Les interrupteurs supportent la même tension de blocage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité de disposer d'autant de sources de tensions isolées que de cellules partielles;</li> <li>- Présence d'un transformateur basse fréquence pour adapter la tension du réseau à celle des machines.</li> </ul>
<b>Imbriquée</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tension de blocage des interrupteurs est identique;</li> <li>- Pas de déséquilibre de tensions aux bornes des condensateurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Volume prohibitif du nombre de condensateur requis;</li> <li>- Associe à la stratégie de commande une stratégie de pré-charge adéquate.</li> </ul>
<b>Hybrides</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Génère un nombre de niveaux plus élevés que celles dites homogènes;</li> <li>-Génère une tension avec moins d'harmoniques pour un même nombre de semi-conducteurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exigences des stratégies de commande un peu plus complexes et peuvent poser des problèmes au niveau des échanges énergétiques entre convertisseurs.</li> </ul>

### 3. METHOLOGIE

#### 3.1 Techniques de modulation à largeur d'impulsion

Il existe trois principales techniques de modulation à savoir:

- La modulation sinusoïdale;
- La modulation vectorielle;
- La modulation par hystérésis.

La modulation sinusoïdale est retenue pour notre étude compte tenu sa facilité d'implémentation. Elle est classée en trois types.

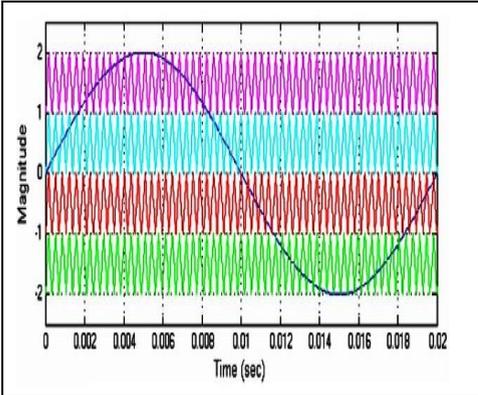


Fig. 5: Phase Disposition (PD)

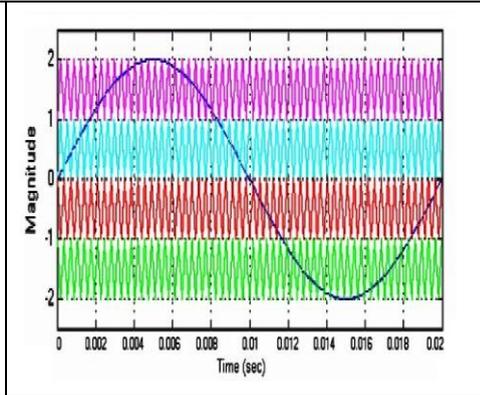


Fig. 6: Phase Opposition Disposition (POD)

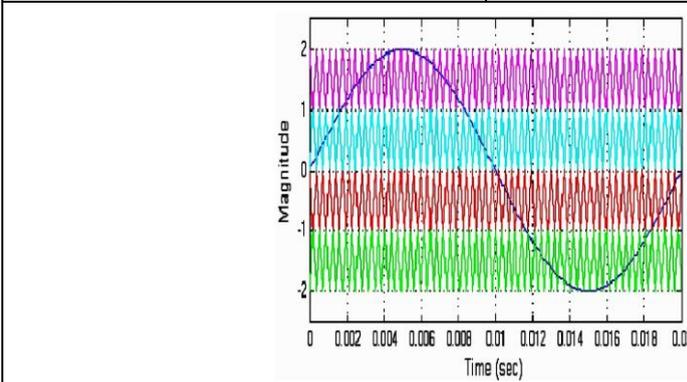


Fig. 7: Alternative Phase Opposition Disposition (APOD)

Pour effectuer la commande d'un convertisseur à 05 niveaux, les impulsions de commande des interrupteurs de puissance sont issues d'une comparaison du signal de référence (sinusoïdale) et signaux triangulaires (porteuses).

### 3.2 Caractéristiques de la modulation sinusoïdale [Talha et al., 2003]

- Indice de modulation,  $m = f_c / f_m$

$f_c$ , Fréquence de la porteuse (signal triangulaire) et  $f_m$ , Fréquence de la modulante (signal sinusoïdale)

- Coefficient de réglage d'amplitude,  $\delta = A_m / A_c$

$A_m$ , Amplitude de la porteuse et  $A_c$ , Amplitude de la modulante.

### 3.3 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 dPA est un 5-Uplet défini par:

$R = (P, T, Pré, Post, M_0)$ , tel que:

P et T sont, respectivement, des ensembles finis et non vides de places de transitions, tel que,  $P \cap T = \emptyset$

Pré, est l'application indicielle avant, tel que:  $Pré: P \times T \rightarrow N$  si  $h(P) = D$  et  $Pré: P \times T \rightarrow R^+$ .

Post, est l'application d'incidence arrière, telle que:  $Post: P \times T \rightarrow N$  si  $h(P) = D$  et  $Post: P \times T \rightarrow N^+$

$M_0$ , est le marquage. La matrice d'incidence associée à un RdP est la suivante:

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

#### 4. MODELISATION PAR RdP DE LA COMMANDE D'UN BRAS DU CONVERTISSEUR NPC A 05 NIVEAUX

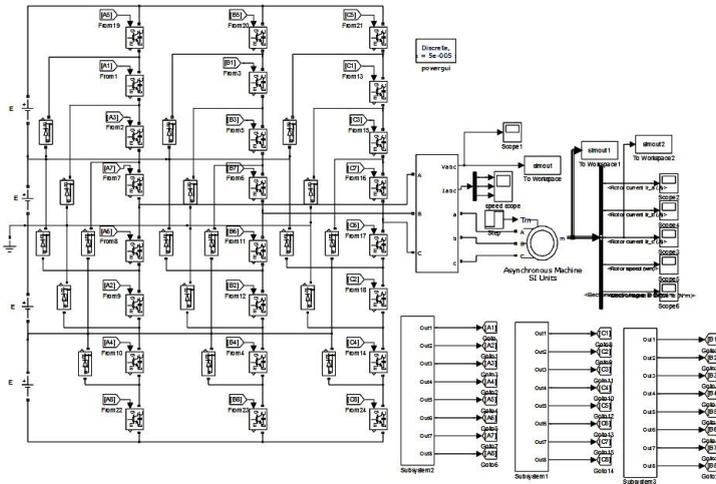


Fig. 5: Convertisseur triphasé NPC à 05 niveaux

Cette modélisation s'effectue en cinq (05) principales étapes.

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

Les tensions de références triphasées, ont pour expressions

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_1 \sin \omega t \\ V_{ref2} = V_2 \sin(\omega t - 2/3 \pi) \\ V_{ref3} = V_3 \sin(\omega t - 4/3 \pi) \end{cases}$$

Celles des quatre(04) porteuses triangulaires

$$\begin{cases} U_{P1}(t) = U_{C1}(t/T_p + 1) \\ U_{P2}(t) = U_{C2}(-t/T_p - 1) \\ U_{P3}(t) = U_{C2}(2t/T_p + 1) \\ U_{P4}(t) = U_{C4}(-2t/T_p + 1) \end{cases}$$

Avec-  $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = U_C$  , les quatre (04) tensions d'alimentation continue du NPC à 05 niveaux, et  $T_p$  , étant la période du signal de la porteuse triangulaires.

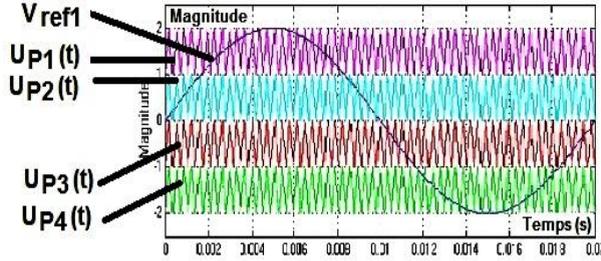


Fig. 8: Phase Disposition (PD)

**Etape 2- Détermination des tensions intermédiaires  $V_{Ki}$**

Les tensions intermédiaires  $V_{Ki}$  sont issues d'un bras K ayant 8 (i) interrupteurs commandables. Les expressions de comparaison entre les tensions de références et celle de la porteuse sont données ci-dessous:

$$\begin{cases} V_{ref_1} > U_{P2} \Rightarrow V_{K4} = 2U_C \\ V_{ref_1} \leq U_{P2} \Rightarrow V_{K4} = -2U_C \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{ref_1} > U_{P1} \Rightarrow V_{K2} = U_C \\ V_{ref_1} \leq U_{P1} \Rightarrow V_{K7} = -U_C \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{ref_1} > U_{P2} \Rightarrow V_{K2} = U_C \\ V_{ref_1} \leq U_{P2} \Rightarrow V_{K6} = -U_C \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{ref_1} > U_{P4} \Rightarrow V_{K1} = 0 \\ V_{ref_1} \leq U_{P4} \Rightarrow V_{K5} = 0 \end{cases}$$

**Etape 3- Détermination des ordres de commandes  $S_i$  des interrupteurs**

$$(V_{ref_k} > U_{P1}) \text{ et } (V_{ref_k} > U_{P2}) \text{ et } (V_{ref_k} > U_{P2}) \text{ et } (V_{ref_k} > U_{P4})$$

$$V_K = 2U_C$$

Alors -  $S_1=1; S_2=1, S_1=1, S_4=1$

$$(V_{ref_k} \leq U_{P1}) \text{ et } (V_{ref_k} > U_{P2}) \text{ et } (V_{ref_k} > U_{P2}) \text{ et } (V_{ref_k} > U_{P4})$$

$$V_K = U_C$$

Alors -  $S_1=0; S_2=1, S_2=1, S_4=1$

$$(V_{ref_k} \leq U_{P1}) \text{ et } (V_{ref_k} \leq U_{P2}) \text{ et } (V_{ref_k} > U_{P2}) \text{ et } (V_{ref_k} > U_{P4})$$

$$V_K = 0$$

Alors -  $S_1=0; S_2=0, S_2=1, S_4=1$

$$(V_{ref_k} \leq U_{P1}) \text{ et } (V_{ref_k} \leq U_{P2}) \text{ et } (V_{ref_k} \leq U_{P2}) \text{ et } (V_{ref_k} > U_{P4})$$

$$V_K = -U_C$$

Alors -  $S_1=0; S_2=0, S_2=1, S_4=1$

$$(V_{ref_k} \leq U_{P1}) \text{ et } (V_{ref_k} \leq U_{P2}) \text{ et } (V_{ref_k} \leq U_{P2}) \text{ et } (V_{ref_k} \leq U_{P4})$$

$$V_K = -2U_C$$

Alors-  $S_1=0; S_2=0; S_2=0; S_4=1$

Alors-  $V_K = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_6 + V_7 + V_8$

Et-

$$\begin{cases} S_1 = \bar{S}_3 \\ S_2 = \bar{S}_1 \\ S_2 = \bar{S}_6 \\ S_4 = \bar{S}_5 \end{cases}$$

De cette analyse, il en découle le modèle Réseaux de Pétri de la commande d'un bras du convertisseur NPC à 05 niveaux présenté sur la figure antérieure.

**Etape 4- Détermination du modèle RdP**

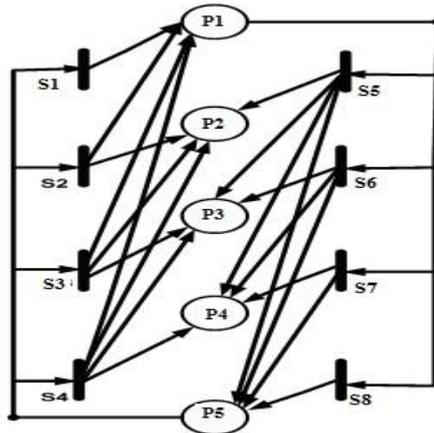


Fig. 9: Modèle RdP d'un bras K du convertisseur NPC à 5

La figure présente un modèle RdP de commande à modulation sinusoïdale à largeur d'impulsion d'un bras de convertisseur NPC à 05 niveaux.

**Etape 5- Détermination de la matrice de commande**

La matrice de commande d'incidence, avant le modèle RdP précédent est la suivante:

$$W^+ = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Paramètres de simulation

Paramètres	Valeur
Tension continue	100 V
Fréquence de référence	50 Hz
Fréquence des porteuses	1000 Hz
Indice de modulation	0.

**5. RESULTATS**

Les résultats en figures ci-dessous sont obtenus à l’aide du logiciel de simulation Matlab/Simulink. Nous présentons les niveaux de tensions et les Taux de Distorsion d’Harmonique (TDH) des convertisseurs NPC, Pont en H et Hybride monophasés à 05 niveaux de tensions.

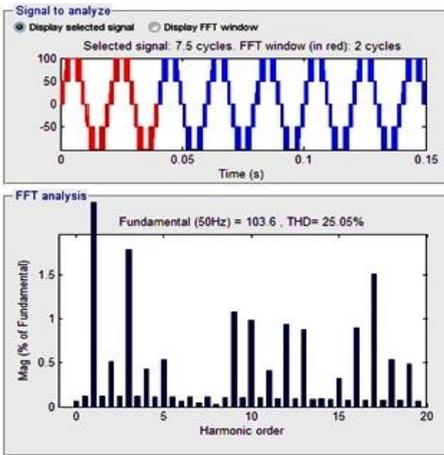


Fig. 10: Tension de sortie et TDH du NPC à 05 Niveaux (PD)

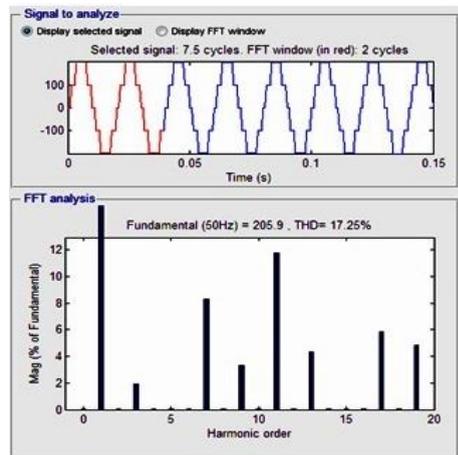


Fig. 11: Tension de sortie et TDH du pont en H à 05Niveaux (APOD)

Le tableau de comparaison ci-dessous présente les différents TDH des types de modulation sinusoïdale sur les topologies NPC, Pont en H et NPC-H (Hybride) à 05 niveaux.

Commande	TDH (%)		
	NPC	Pont en H	H-NPC
PD	25.05	17.29	24.98
POD	25.12	17.26	24.95
APOD	25.10	17.25	24.96

### 6. DISCUSSIONS

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la topologie de convertisseurs de type NPC à cinq niveaux de tension, possède un fort TDH de 25.25 % , ceci reste un pourcentage élevé pour les machines électrique.

Par contre, le convertisseur pont en H commandé par APOD à un THD plus réduit de 17.25 %. Cette topologie a l'avantage d'accroître la tension de sortie du convertisseur et offre une meilleure qualité spectrale de la tension de sortie.

Au vue de la méthodologie élaborée ci-dessus qui permet de rendre moins complexe la commande par modulation sinusoïdale des différentes topologies des convertisseurs multi niveaux, nous l'appliquerons sur des convertisseurs pont en H de 7.11 % et 15 niveaux, ceci dans le but d'obtenir des niveaux de tensions encore plus élevés et des TDH encore plus faibles.

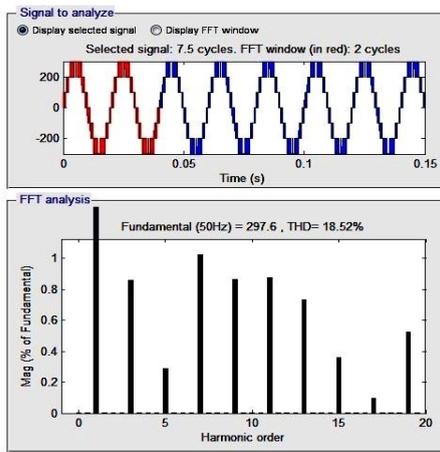


Fig. 12: Tension de sortie et TDT d'un Pont en H à 07 niveaux (APOD)

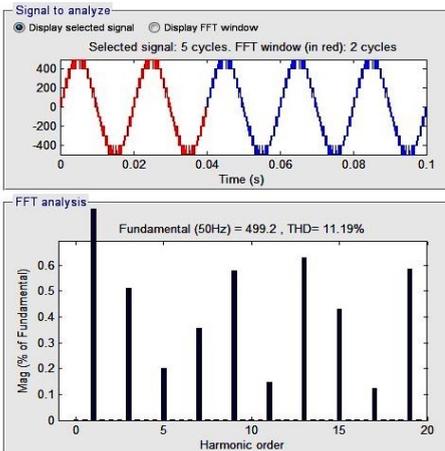


Fig. 13: Tension de sortie et TDT d'un Pont en H à 11 niveaux (APOD)

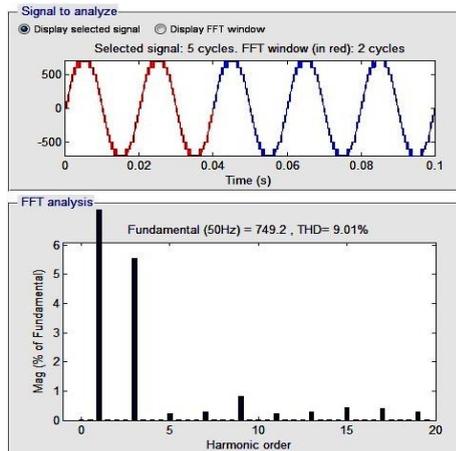


Fig. 14: Tension de sortie et TDT d'un Pont en H à 15 niveaux (APOD)

## 7. CONCLUSION

Dans cet article, il a été question de faire une étude comparative des topologies des convertisseurs multi niveaux en proposant une méthodologie qui rendra moins complexe leurs commandes tout en permettant d'obtenir des niveaux de tensions plus élevées et des taux de torsion d'harmonique plus bas.

De ces résultats obtenus, nous constatons que l'outil de modélisation des systèmes discrets à savoir les RdP, nous a permis de mieux appréhender les ordres de commande des interrupteurs d'un bras du convertisseur NPC à 05 niveaux, et de pouvoir l'étendre sur les niveaux encore supérieurs. De ces résultats obtenus, nous observons que la topologie de convertisseur Pont en H commandée en APOD est celle qui permet d'obtenir une meilleure qualité spectrale des niveaux de tensions élevées et des TDH plus bas.

Une illustration est faite sur un bras d'un Pont en H à 15 niveaux alimentés par 07 sources de tension continue de 100 V. Il en résulte que nous obtenons une tension sinusoïdale d'amplitude 749.2 V pour un THD de 9.01 %. De cette approche de commande, nous pouvons donc obtenir des convertisseurs multi niveaux des niveaux de tensions sinusoïdales souhaitées.

## REFERENCES

- [Ahmidi, 2010] A. Ahmidi, '*Participation de parcs de production éolienne au réglage de la tension et de la puissance réactive dans les réseaux électriques*', Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Centrale de Lille, 200 p., 2010.
- [Amghar et al., 2013] B. Amghar, M. Darcherif, J-P. Barbot, '*Z( TN ) -Observability and Control of Parallel Multicell Chopper using Petri Nets*', IET Journals Power Electronics, Vol. 46 N°4, pp. 710 - 720, 2013.
- [David et al., 1992] R. David et H. Alla, '*Du Grafcet aux Réseaux de Petri. Hermès*', Paris, 1992.
- [Mirecki, 2005] A. Mirecki, '*Etude Comparative de chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance*', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [Meynard et al., 1993] T. Meynard and H. Foch, '*Imbricated Cells Multi-Level Voltage-Source Inverter for High Voltage Applications*', E PE- 1993, EPE Journal, Vol.3, June 1993.
- [Song-Manguelle et al., 2000] J. Song-Manguelle, S. Mariethoz, M. Veenstr et A. Rufer, '*Convertisseurs multi niveaux asymétriques pour des Applications de moyenne et forte puissance*', E PF'00 : Actes du 8<sup>ème</sup> Col. Electr. De Puissance du Futur, pp. 295- 300, Lille, France, 2000.
- [Talha et al., 2013] A. Talha, E. M. Berkouk, M.S. Boucherit, '*Etude de Stabilité des Tensions d'Entrée de l'Onduleur à Sept Niveaux à Structure NPC en Utilisant un Demi Pont de Clamping*', First International Conference on Energy Efficiency ICEE'2003, Boumerdes, Algeria 2003.
- [Yazdani et al., 2006] A. Yazdani and R. Irvani, '*A Neutral-Point Clamped Converter System for Direct-Drive Variable-Speed Wind Power Unit*', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, N°2, pp. 596 - 607, June 2006.
- [ZhengPeng et al., 2002] F. ZhengPeng, J. Rodriguez and J.S. Lai, '*Multi-Level Inverters: a Survey of Topologies, Control and Applications*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, N°4, pp. 724 - 738, 2002.