

Commande par gradins d'un convertisseur multiniveau asymétrique à structure cascade pour l'entraînement d'une machine asynchrone

T. Bessaad ^{1*}, R. Taleb ¹, A. Belboula ¹, F. Chabni ¹ et H. Mellah ^{1,2}

¹ Electrical Engineering Department, Hassiba Benbouali University
LGEER Laboratory, Chlef, Algeria

² Electrical Engineering Department, Ferhat Abbas Sétif 1 University
LAS Laboratory, Sétif, Algeria

(reçu le 13 Janvier 2019 - accepté le 29 Mars 2019)

Résumé - Cet article consiste à étudier la commande des onduleurs multi-niveaux asymétrique appliquée à la conduite d'une machine asynchrone triphasée. On a étudié ce type d'onduleurs parce qu'il est susceptible de générer des tensions quasi sinusoïdale ayant un nombre de niveau impair largement qui peuvent atteindre entre $2K+1$ et 3^K niveaux (K : cellules à pont complet). L'utilisation de la structure multi-niveaux cascade afin d'améliorer beaucoup plus la qualité de tension de sortie sans augmenter à priori le nombre de cellules d'onduleurs à pont complet ainsi que cette structure est un intérêt certain car elle contient un nombre réduit d'interrupteurs en comparaison avec les autres. Pour l'entraînement à la vitesse variable pour cette machine, la commande vectorielle avec des correcteurs classiques est appliquée ensuite. Les résultats de simulation confirment la validité et l'efficacité de ce type d'onduleur.

Abstract - This paper consists in studying the asymmetric multi-level inverter control applied to the driving of a three-phase asynchronous machine. This type of inverter has been studied because it is capable of generating quasi-sinusoidal voltages with an odd number of levels that can reach between $2K + 1$ and 3^K levels (K : full bridge cells). The use of the multi-level cascade structure to improve the output voltage quality much more without increasing the number of full bridge inverter cells as well as this structure is of interest because it contains a reduced number of switches in comparison with others. For the variable speed training for this machine, the vector control with conventional correctors is then applied. The simulation results confirm the validity and efficiency of this type of inverter.

Keywords: Asymmetric multi-level inverters - Vector control - Three-phase machine.

1. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, l'étude des performances des moteurs asynchrones alimentés par des onduleurs fait l'objet d'innombrables publications scientifiques. Le moteur asynchrone attire particulièrement l'attention à cause de sa robustesse et son faible coût de fabrication.

L'avènement de l'électronique de puissance à semi-conducteurs et le grand nombre de convertisseurs développés récemment permettent le choix d'une association optimale d'un moteur à courant alternatif et d'un onduleur de tension ou de courant à deux niveaux ou multi-niveaux. Parmi les moteurs à courant alternatif, la machine asynchrone présente une grande dynamique de réglage et autorise des vitesses élevées. Le moteur à cage offre en plus une grande puissance massique et constitue une machine fiable grâce à l'absence du collecteur.

Les avancées technologiques obtenues ces dernières années dans le domaine des composants de l'électronique de puissance ont favorisé une croissance du marché des

* ta.bessaad@gmail.com

convertisseurs de puissance. L'électronique de puissance s'est imposée comme un des éléments essentiels dans la conversion de l'énergie électrique.

Du point de vue d'utilisateur d'énergie, une meilleure qualité des alimentations est un des paramètres du développement des applications de l'électricité. Par contre, la multiplication des convertisseurs se traduit par une augmentation de la pollution harmonique des réseaux et davantage de consommation de puissance réactive.

Après l'apparition des convertisseurs multi niveaux (symétrique et asymétrique) qui sont utilisés pour l'alimentation des machines alternatives de fortes puissances, plusieurs structures de ces convertisseurs multi niveaux ont été proposées telles que: les onduleurs multi niveaux à potentiel distribué NPC, cellules imbriquées et ceux à structure Hybride et Cascade...etc.

Dans le cas de notre travail, nous avons étudiée l'onduleur à différentes structures citées précédemment. Ce dernier permet d'augmenter la puissance délivrée à la charge. Ainsi, il permet de générer une tension la plus sinusoïdale possible.

Ces types de convertisseurs permettent de synthétiser un signal sinusoïdal à partir de plusieurs niveaux de tension par bras ou phase de l'onduleur (cela dépend de sa structure).

Plus on augmente le nombre de niveaux, plus le signal de sortie s'approche de la sinusoïde avec un minimum de distorsion harmonique. Cet article propose une approche générale basée sur une alimentation asymétrique des différents onduleurs partiels.

Ainsi, le convertisseur est susceptible de générer un nombre impair de niveaux, compris entre $2k + 1$ et 3^k . Cette façon de procéder offre une très large bande de possibilités d'utilisation de ce type de montage, et entraîne une conception optimale de l'organe commande, sous réserve des contraintes liées à chaque interrupteur.

Au paragraphe 2, nous traitons les principales topologies des convertisseurs multi-niveaux: leurs structures et analyse fonctionnelle, leurs avantages et leurs inconvénients, ainsi que la terminologie des convertisseurs multi-niveaux. Au paragraphe 3, nous présentons la validation des trois commandes, par paliers ou par gradins, par triangulo-sinusoïdal et hybride proposée sur les onduleurs multi-niveaux asymétrique alimentant une machine asynchrone triphasée et les résultats de simulation avec Matlab/Simulink sont présentés au paragraphe 4.

2. TERMINOLOGIE DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

Les convertisseurs à niveaux multiples peuvent être implémentés de différentes manières. La technique la plus simple est la connexion parallèle ou série de semi-conducteurs de puissance. D'autres techniques plus complexes comme l'enchevêtrement de convertisseurs conventionnels sont également exploitées. Les limites des semi-conducteurs de puissance et celles des convertisseurs conventionnels s'en trouvent ainsi repoussées [2].

2.1 Topologie à potentiel distribué et ses variantes structures de base

Nous avons représenté la structure d'un onduleur NPC (Neutral Point Clamped), à diodes de blocage, pour cinq niveaux.

Pour une tension d'alimentation U donnée, la tension au bornes de chaque condensateur sera donc $U/4$ et la contrainte en tension exercée sur chaque composant principal est fixée par le biais des diodes de blocage à la valeur de la tension d'un seul condensateur, c'est-à-dire $U/4$ [1-3, 7]. Les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence 0 [2, 4-6].

Chaque branche du convertisseur est vue comme un commutateur dont les positions permettent de modifier le potentiel du point a . Ce point est connecté à chaque fois à l'une des tensions aux bornes des condensateurs, qui, des fois sont mises en série. [2, 5, 7].

L'analyse fonctionnelle montre qu'il existe au total N configurations possibles de commutation pour délivrer les N niveaux de tension entre les points a et 0 .

2.2 Topologie à cellules imbriquées

Dans la topologie multi-niveau proposée par T. Meynard et H. Foch, plusieurs cellules 'condensateurs et paire d'interrupteurs' sont imbriquées les unes dans les autres,

$$(V_3=2V_2, V_4=3V_2, V_5=4V_2, \dots, V_n=(N-1)V_2) \tag{1}$$

Le principe de fonctionnement de cette topologie est quasiment identique à celui de la topologie NPC. [2-4].

2.3 Topologie basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés

La dénomination complète de cette topologie, introduite par Marchesoni *et al.* 1988 [3, 4]. La structure de l'onduleur cascade à cinq niveaux est représentée sur la figure 1.

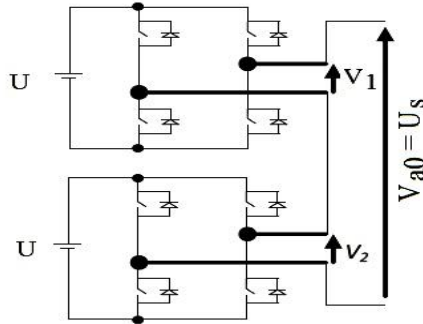


Fig.1: Structure monophasée d'un onduleur cascade à cinq niveaux de tension

Pour cet onduleur, deux cellules à ponts complets monophasés et deux alimentations sont utilisées. Cette figure représente la structure d'un convertisseur multi-niveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou ponts en H, ou cellules partielles).

Chaque cellule partielle est alimentée par une source de tension continue. Elles ont toutes la même valeur et doivent être galvaniquement isolées les unes des autres, afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série. En ne prenant en considération que les trois niveaux distincts générés par chacune de ses cellules, un convertisseur composé de K ponts en H connectés en série dispose de 3^k états de commutation distincts [3, 5, 7].

L'approche terminologique que nous proposons dans cette section facilite et rend uniforme le design des convertisseurs multi-niveaux.

● Facteurs de dissymétrie totale et partielle

Le convertisseur multi-niveaux délivre par phase une tension continue notée U_s . Celle-ci s'obtient à partir des tensions continues d'alimentation des cellules partielles par la relation ci-dessous [10, 18, 20]:

$$U_s = 2 \sum_{j=1}^K U_{dj} \tag{2}$$

Les tensions continues U_{dj} sont proportionnelles à la tension continue U_s , et le coefficient de proportionnalité est un entier naturel que nous appelons facteur de dissymétrie totale. Nous le notons λ_j [2, 4, 8-9].

$$\lambda_j = U_s / U_{dj} \quad , j = 1..K \tag{3}$$

Le coefficient de proportionnalité entre deux tensions continues alimentant deux cellules partielles consécutives de rang $j = h$ et $j = h + 1$ est noté δ_j et appelé facteur de dissymétrie partielle [2, 8, 9].

$$\delta_h = \frac{U_{dh}}{U_{d(h-1)}} \quad , \quad h = 2..K \tag{4}$$

Nous entendons par convertisseur multi-niveaux symétrique, un convertisseur multi-niveaux constitué de cellules partielles dont les tensions continues sont toutes égales. Dans ce cas, tous les facteurs de dissymétrie totale sont égaux, et tous les facteurs de dissymétrie partielle valent l'unité.

$$\begin{cases} \lambda_j = \lambda_{j+1}, \forall j = 1 \dots (K - 1) \\ \delta_h = \delta_{h+1} = 1, \forall h = 2 \dots K \end{cases} \tag{5}$$

S'il existe au moins un facteur de dissymétrie totale différent des autres, ce qui veut dire qu'il existe au moins un facteur de dissymétrie partielle différent de un, alors le convertisseur est appelé convertisseur multiniveaux *asymétrique*.

A la figure 2, nous avons représenté un exemple de forme d'onde de la tension U_s à la sortie d'un convertisseur multi-niveaux quelconque. Elle est constituée d'un ensemble de N valeurs distinctes, appelées niveaux.

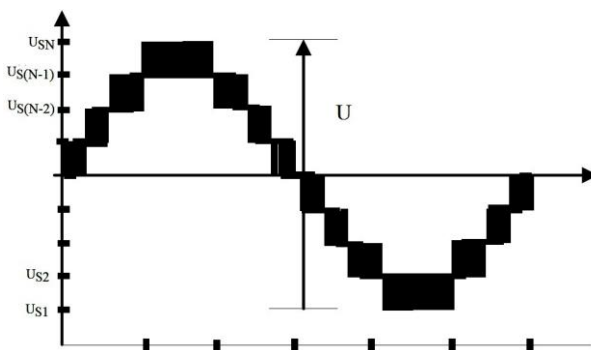


Fig. 2: Exemple de forme d'onde d'un convertisseur

A la figure 3, nous avons représenté les différentes possibilités de commutation des trois cellules partielles.

Ces deux figures montrent que la génération d'un niveau de tension donné sur une phase ne peut se faire qu'avec une et une seule possibilité de commutation des différentes cellules partielles sur cette phase. A partir de la figure 3 par exemple, on voit

que la seule et unique possibilité de commutation des cellules partielles permettant de générer la tension $U_s = +7$, est la suivante :

$$U_{p11} = +1; U_{p12} = -3 \text{ et } U_{p13} = +9 \tag{6}$$

Il n'existe donc aucun état redondant.

Pour pouvoir générer par exemple $N = 27$ niveaux avec un convertisseur symétrique,

Il aurait fallu $K = 13$ cellules partielles en série sur une seule phase [2, 4, 7].

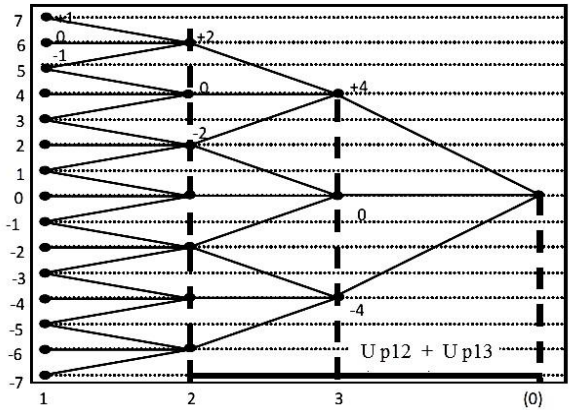


Fig. 3: Possibilités de commutations des trois-cellules partielles sur un convertisseur multi niveau: $U_{d1} = 1$; $U_{d2} = 2$ et $U_{d3} = 4$

Trois conditions sont suffisantes pour définir théoriquement un convertisseur multi niveaux asymétrique à pas uniforme [2-3, 6].

-- Les tensions u_{dj} doivent être définies telles que:

$$u_{d1} \leq u_{d2} \leq \dots \leq u_{dK} ; u_{dj} = U_{dj} / U_{d1} \tag{7}$$

-- Les tensions u_{cj} doivent être calculées en respectant la condition suivante:

$$u_{dj} \leq 2 \left(\sum_{L=1}^{j-1} u_{dL} \right) + 1, j = 1, 2, \dots, K \tag{8}$$

-- Le nombre de niveaux correspondant doit être calculé de la façon suivante:

$$N = 2 \left(\sum_{j=1}^K u_{dj} \right) + 1 \tag{9}$$

En notant U_{d1} la plus petite des tensions redressées, la tension alternative du secondaire qui alimente le pont de diodes correspond à la plus petite amplitude (cas d'une alimentation par pont de diode).

Le **Tableau 1**, résume quelques possibilités pour, d'une part générer à la sortie de l'onduleur une tension ayant le même nombre de niveaux avec bien sur des alimentations différentes avec le même nombre de cellules d'onduleurs à pont complets [2, 7].

Tableau 1: Exemple de possibilités de solutions redondantes

N	u _{d1}	u _{d2}	u _{d3}
7	1	1	1
9	1	1	2
11	1	1	3
	1	2	2
13	1	1	4
	1	2	3
15	1	1	5
	1	2	4
	1	3	3
17	1	1	6
	1	2	5
	1	3	4
19	1	1	7
	1	2	6
	1	3	5
	1	4	4
21	1	1	8
	1	2	7
	1	3	6
	1	4	5

3. DIFFERENTES STRATEGIES DE COMMANDE DE L'ONDULEUR

Les stratégies de commande des convertisseurs multi niveaux sont une adaptation de celles appliquées aux convertisseurs deux niveaux [10].

Les différentes stratégies de commande de l'onduleur peuvent être classées comme suit [14, 23]:

- Commande par gradins;
- Commande triangulo-sinusoidal (N-1) porteuses;
- Commande hybride.

Dans la suite de notre étude, on va utiliser la commande par gradins, pour un onduleur asymétrique à sept niveaux. On va utiliser un onduleur asymétrique à sept niveaux, (avec $k = 2$, $u_{d1} = 1$, $u_{d2} = 2$ p.u. $u_{d3} = 2$ p.u.).

4. COMMANDE PAR PALIERS OU PAR GRADINS

Dans des applications où l'amplitude et la fréquence de la tension sont relativement fixes, on n'a pas forcément besoin d'une tension modulée. Dans ce cas, l'onde fondamentale est suffisante pour la génération d'une tension dont la distorsion harmonique est faible.

La méthode de commande par paliers consiste à quantifier cette grandeur de référence (image désirée du fondamental), en un nombre déterminé de paliers, [10, 11]. Cette méthode de commande offre deux degrés de liberté à l'utilisateur,

- Le convertisseur peut être à pas uniforme, dans ce cas $E_1 = E_2 = \dots = E$.
- Les p angles de commutations sur une période (θ_i , $i = 1 \dots p/2$) peuvent donc être choisis de façon à atteindre certaines performances.
- Le pas de la tension et les angles de commutation peuvent être choisis afin de pouvoir obtenir la minimisation du taux de distorsion harmonique, la suppression de certaines harmoniques basse fréquence entre autres.

Cette commande est facile à implémenter, et se prête le mieux lorsqu'une analyse simplifiée de la tension à la sortie du convertisseur est nécessaire à la compréhension du système dans lequel est inséré le convertisseur. Les angles de commutation, pour passer d'un niveau à l'autre, peuvent être déterminés à l'avance.

Lorsqu'elle est appliquée à la commande d'un convertisseur multi niveau avec mise en série d'onduleurs monophasés, on constate que les différentes cellules n'ont pas une même durée de conduction. Il en résulte donc un déséquilibre dans la répartition des pertes par commutation et par conduction.

Par une rotation adéquate des commutations, ces pertes peuvent être équilibrées entre les différentes cellules, sans modification de l'onde de tension générée à la sortie du convertisseur. [9, 10].

5. RESULTATS DE SIMULATION

La figure .4 illustre les formes d'ondes des cellules partielles U_{p11} , U_{p12} , et la tension V_a avec son spectre d'harmonique pour l'onduleur asymétrique avec $U_d = 100 \text{ V}$.

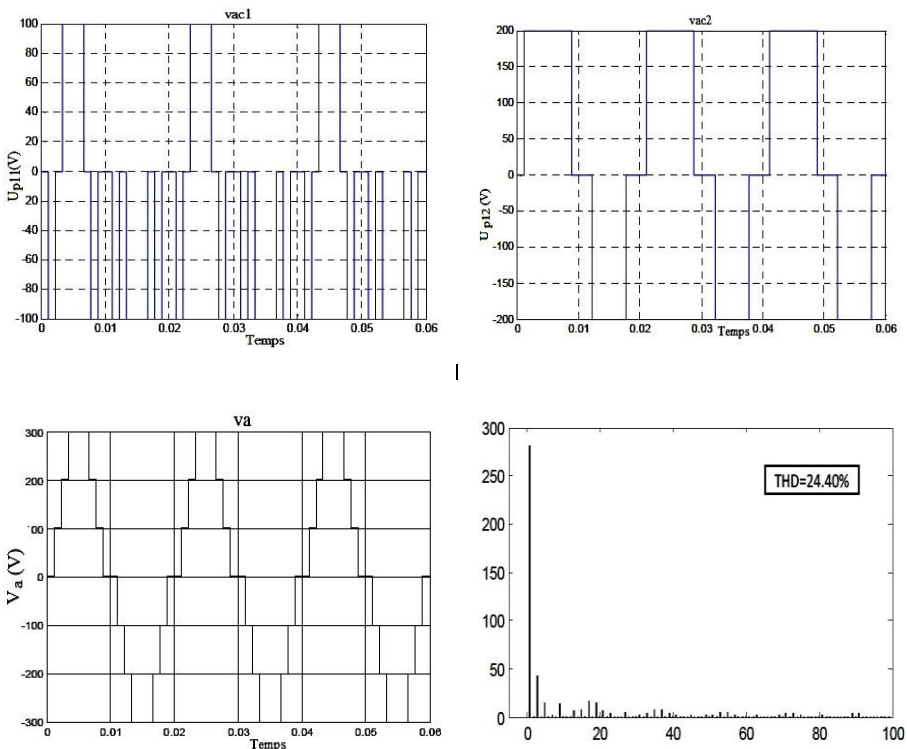


Fig. 4: La tension simple V_a de l'onduleur à sept niveaux et son spectre harmonique et tensions partielles U_{p11} , U_{p12}

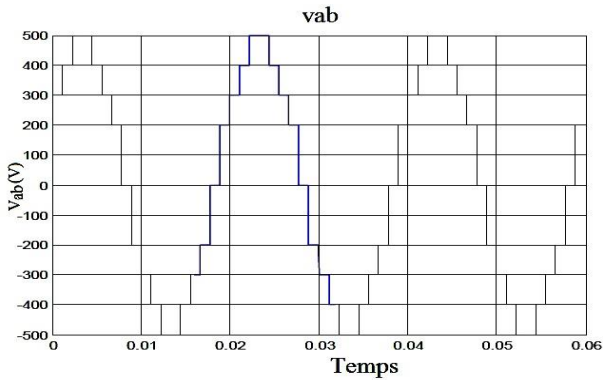


Fig. 5: Forme d'onde de tension composée V_{ab}

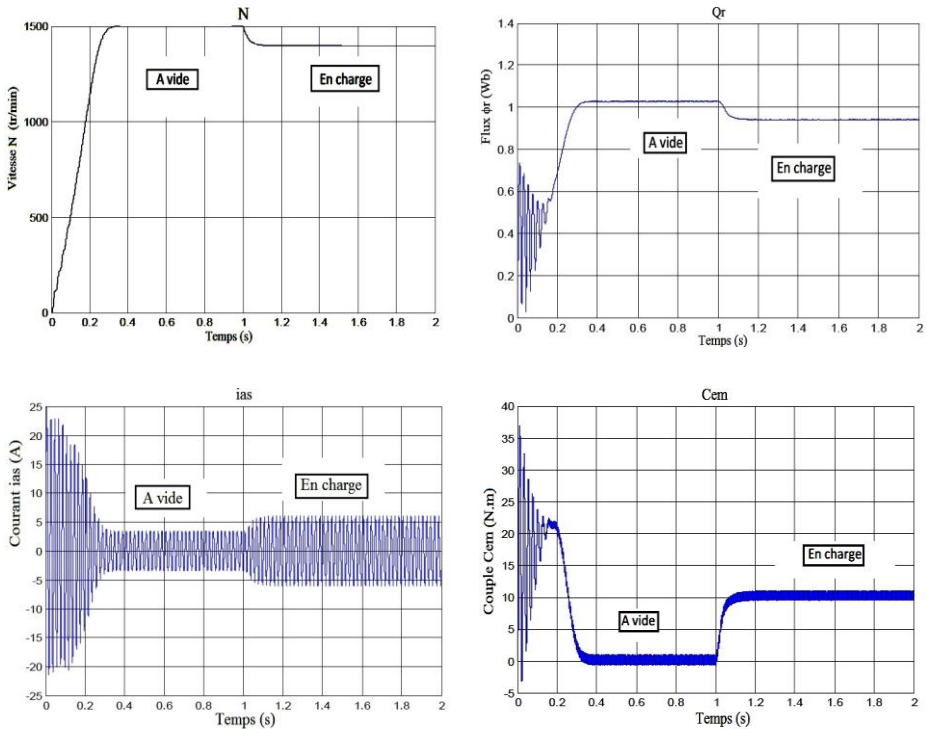


Fig. 6: Conduite de la machine asynchrone triphasée alimentée par onduleur triphasé asymétrique commandé par la technique gradins

6. CONCLUSION

La tension de sortie est formée de créneaux rectangulaire, riche en harmoniques. Le filtrage de cette tension à la fréquence industrielle, est lourd, coûteux et les résultats médiocres. D'où la nécessité de la modulation de largeur d'impulsion.

REFERENCES

- [1] J-S. Lai and F.Z. Peng, 'Multilevel Converters- A New Breed of Power Converters', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, N°3, pp. 509 - 517, Mai/Juin 1996.

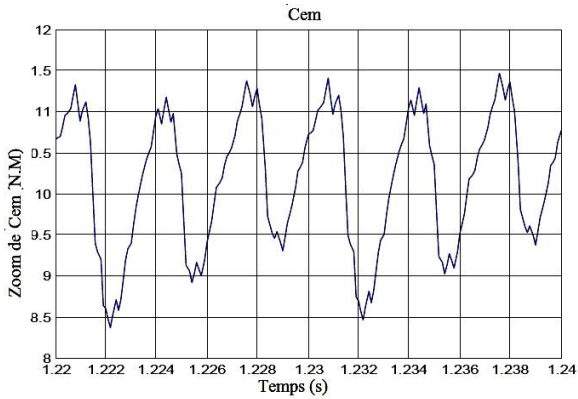


Fig. 6bis: Zoom de Cem

- [2] J. Song-Manguelle, '*Convertisseurs Multi niveaux Asymétriques Alimentés par Transformateur-Multi secondaires Basse Fréquence: Réaction au Réseau d'Alimentation*', Thèse de Doctorat, Lausanne, E.P.F.L, 2004.
- [3] J.S. Mariéthoz, '*Étude Formelle pour la Synthèse de Convertisseurs Multi niveaux Asymétriques: Topologies, Modulation et Commande*', Thèse de Doctorat. Lausanne, E.P.F.L, 2005.
- [4] K. Imarazene, '*Application des réseaux de Neurones à Commande par Elimination d'Harmoniques des Onduleurs Multi niveaux*', Mémoire de Magister, E.N.P, El Harrach, Alger, 2005.
- [5] K. Yakoub, '*Réduction des Effets de la Tension Homopolaire dans les Associations Onduleurs Multi niveaux Moteur à Induction*', Mémoire de Magister, U.H.L, Batna, 2005.
- [6] O. Bouakaz, '*Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux Fonctionnement Symétrique et Asymétrique*', Mémoire de Magister, U.H.L, Batna, 2005.
- [7] A. Rufer, '*Les Onduleurs Multi niveaux: Evolution de la Recherche et Applications Futures: Augmentation de Puissance et Réduction des Harmoniques par des Onduleurs Multi niveaux*', Articles spécialisés, E.P.F.L, Lausanne, Suisse, 2002.
- [8] J. Song-Manguelle, M. Veenstra, S. Ariéthoz et A. Rufer, '*Convertisseurs Multi niveaux Asymétriques Pour des Applications de Moyenne et Forte Puissance*', Article, E.P.F.L, Lausanne, Suisse, 2000.
- [9] J. Song-Manuela, S. Mariethoz, M. Veenstra and A. Rufer, '*A Generalized Design Principle of a Uniform Step Asymmetrical Multilevel Converter for High Power Conversion*', Article, E.P.E - Graz, 2001.
- [10] O. Fadli, '*Modélisation et Commande Non Linéaire de l'Association: Machine Synchrone à Aiment Permanents-Onduleur de Tension à Trois Niveaux*', Mémoire de Magister, U.H.L, Batna, 2006.
- [11] M.D. Manjrekar, P.K. Steimer and T.A. Lipo, '*Hybrid multilevel power conversion system: a competitive solution for high-power applications*', IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 36, N°3, pp. 834 - 841, May-June, 2000.