

Commande par MLI pré-calculée d'un onduleur asymétrique. Application à la commande vectorielle d'une MAS de forte puissance

Rachid TALEB, M'hamed HELAIMI, Djilali BENYOUCEF, Zinelaabidine BOUDJEMA

Université Hassiba Benbouali de Chlef, Laboratoire Génie Electrique et Energies Renouvelables (LGEER)
Hay Salem, Route Nationale No 19, Chlef, Algérie

r.taleb@univ-chlef.dz

halimil1976@yahoo.fr

ben_plasma@yahoo.fr

boudjema1983@yahoo.fr

Résumé— Les onduleurs multiniveaux asymétriques triphasés étudiés sont constitués par la mise en série d'onduleurs partiels par phase (structure cascade). La commande de ces derniers par la stratégie MLI pré-calculée (MLIPC) permet d'annuler les harmoniques les plus gênantes et de réguler la composante fondamentale de la tension de sortie de l'onduleur avec l'avantage majeur d'une faible fréquence de commutation des composants électroniques. Un cas particulier est étudié : onduleur asymétrique à sept niveaux à pas uniforme. Cet onduleur permet d'alimenter une machine asynchrone triphasée de forte puissance (MAS) associée à la commande vectorielle. Les performances de la stratégie MLI pré-calculée sont analysées sur la base d'une comparaison avec la stratégie MLI triangulo-sinusoidale (MLITS).

Mots clés— Onduleur asymétrique, MLI pré-calculée (MLIPC), MLI triangulo-sinusoidale (MLITS), Commande vectorielle, Machine asynchrone de forte puissance.

I. INTRODUCTION

En électronique de puissance moderne, l'étude des onduleurs multiniveaux représente un domaine de recherche important, recherche liée également à des applications toujours plus performantes et plus puissantes. Si depuis plus d'une décennie les onduleurs appelés à trois niveaux sont devenus des produits presque classiques, d'autres topologies sont apparues au cours des dernières années, aussi bien au niveau académique qu'au niveau industriel. Parmi ces topologies on compte principalement la technique des onduleurs NPC (Neutral Point Clamped) à potentiels distribués [1], la technique dite des cellules imbriquées et superposées [2], ainsi que la technique des convertisseurs à cellules en série [3]. Cet article porte sur l'étude des convertisseurs multiniveaux triphasés dont la topologie est basée sur la mise en série de plusieurs onduleurs monophasés (cellules partielles) sur la même phase. La figure 1 montre un convertisseur avec k onduleurs partiels en série. Chaque cellule partielle de rang j , ($j = 1 \dots k$) est alimentée par une tension continue u_{dj} . Elle montre qu'en alimentant les cellules

partielles par des tensions continues de valeurs différentes (alimentation asymétrique), il est possible d'augmenter le nombre de niveaux à la sortie du convertisseur, sans complexité supplémentaire de sa structure [4, 5]. Ces onduleurs sont connus sous le nom d'onduleurs multiniveaux asymétriques.

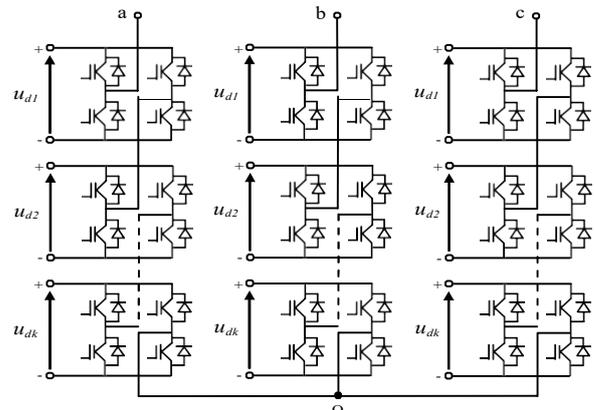


Fig. 1 Mise en série de k onduleurs partiels monophasés par phase

Certaines applications nécessitent des performances de hauts niveaux mais la présence des harmoniques d'ordre peu élevé dans le signal de tension peut dégrader ces performances. Afin d'améliorer la qualité du signal de sortie de l'onduleur multiniveau asymétrique, différentes stratégies de modulation de largeurs d'impulsions (MLI) ont été proposées par différents auteurs [6, 7]. La plus connue est la stratégie MLI triangulo-sinusoidale (MLITS) [8, 9]. Elle pousse les harmoniques vers les fréquences élevées, en ayant recours à des porteuses de hautes fréquences.

Cependant, pour les applications de puissance électrique élevée, les composants électroniques sont limités en fréquence de commutation ce qui limite à son tour la fréquence de la porteuse. On peut remédier à ce problème en appliquant la

stratégie MLI pré-calculée (MLIPC) adaptées au cas des onduleurs multiniveaux asymétriques [10, 11]. Cette technique permet d'annuler les harmoniques les plus gênantes et de réguler la composante fondamentale du signal avec l'avantage majeur d'une faible fréquence de commutation des composants électroniques.

Dans cette étude nous allons comparer les performances de la commande vectorielle indirecte [12] de la MAS de forte puissance (20MW) alimentée par un onduleur asymétrique à sept niveaux commandé par MLITS et MLIPC. Les résultats obtenus sont très promoteurs dans le domaine de forte puissance et/ou haute tension en particulier pour la traction électrique.

II. ONDULEUR MULTINIVEAU ASYMETRIQUE A PAS UNIFORME

Pour obtenir un onduleur multiniveaux asymétrique à pas uniforme ou régulier, les tensions continues d'alimentation des cellules partielles u_{dj} ($j = 1 \dots k$) doivent respecter les deux conditions données par le système (1). Ainsi, le nombre de niveaux correspondant à un groupe donné de tensions intermédiaires s'obtient par la relation (2) [6].

$$\begin{cases} u_{d1} \leq u_{d2} \leq \dots \leq u_{dk} \\ u_{dj} \leq 1 + 2 \sum_{l=1}^{j-1} u_{dl} \end{cases} \quad (1)$$

$$N = 1 + 2 \sum_{j=1}^k u_{dj} \quad (2)$$

La résolution du système (1) est suffisante pour pouvoir fixer les tensions u_{dj} . Ce système peut dans certains cas aboutir à l'obtention de solutions redondantes vérifiant la relation (2). Avec $k = 3$, il existe deux possibilités d'alimentation des onduleurs partiels pour obtenir une tension de 11 niveaux à la sortie du convertisseur, c'est à dire $(u_{d1}, u_{d2}, u_{d3}) \in \{(1, 1, 3), (1, 2, 2)\} p.u.$, et trois possibilités pour obtenir 15 niveaux, c'est à dire $(u_{d1}, u_{d2}, u_{d3}) \in \{(1, 1, 5), (1, 2, 4), (1, 3, 3)\} p.u.$. Cette relation modifie fondamentalement le nombre de niveaux que peut générer la topologie multiniveaux étudiée. Le nombre N dépend non seulement du nombre d'onduleurs partiels en série par phase, mais aussi de la tension continue qui alimente chacun d'eux.

La génération de certains niveaux de tension peut se faire avec plus d'une séquence de commutation sur les différentes cellules partielles. Par exemple, pour $N = 7$ niveaux, il est possible de générer le niveau 1 avec les deux combinaisons suivantes: $\{(-1, 2), (1, 0)\} p.u.$. Ces états redondants peuvent être exploités pour l'optimisation des commutations sur le convertisseur.

III. STRATEGIE MLI PRE-CALCULEE (MLIPC)

Le principe de cette stratégie est basé sur le développement en série de Fourier de la tension u_s à la sortie du convertisseur à pas uniforme [10, 11]. Cette tension admet une symétrie par rapport au demi et au quart de la période. De ce fait, les composantes harmoniques paires en cosinus et en sinus sont

nulles. La décomposition en série de Fourier de cette tension est donnée par la relation suivante:

$$\begin{cases} u_s = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin(n\omega t) \\ u_n = \frac{4u_{d1}}{n\pi} \sum_{i=1}^p \cos(n\theta_i) \end{cases} \quad (3)$$

avec u_n amplitude de l'harmonique de rang n (n impaire), $p = (N-1)/2$ nombre total de commutations sur un quart de période et θ_i angles de commutation ($i = 1, 2, \dots, p$).

Les p angles de commutation de la relation (3) sont déterminés en imposant l'amplitude de la composante fondamentale et en annulant les $(p-1)$ harmoniques. Par exemple, si l'on veut faire varier la valeur des tensions de sortie d'un onduleur asymétrique triphasé à 7 niveaux constitué de $k = 2$ onduleurs partiels alimentés respectivement par le groupe de tension $u_{d1} = 1p.u.$ et $u_{d2} = 2p.u.$, alors il faut déterminer les trois angles de commutation θ_1, θ_2 et θ_3 de façon à annuler les deux premières composantes harmoniques impaires 5 et 7 de la tension composée. Dans ce cas, cela revient à résoudre le système non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 \cos(\theta_i) = s \\ \sum_{i=1}^3 \cos(n\theta_i) = 0 \text{ pour } n \in \{5, 7\} \end{cases} \quad (4)$$

où $s = \pi u_1 / 4u_{d1}$. La solution recherchée doit satisfaire la condition suivante :

$$0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \pi/2 \quad (5)$$

La résolution du système (4) par la méthode de Newton-Raphson donne toutes les solutions possibles pour différentes valeurs de s (figure 2). A partir de cette figure, on remarque qu'il existe une double solution pour $s \in [1.49, 1.85]$. Pour $s \in [0, 0.80]$, $s \in [0.83, 1.14]$ et $s \in [2.53, 2.77]$, aucune solution n'est possible. Ce système accepte une seule solution pour les autres valeurs de s . Particulièrement, pour $s \approx 0.80$, $s \approx 0.81$ et $s \approx 2.76$, on peut noter l'existence de solutions isolées.

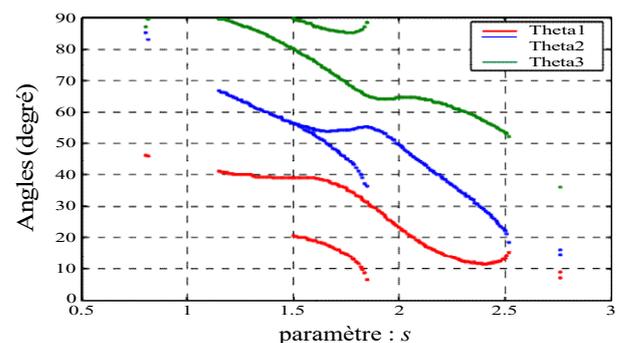


Fig. 2 Angles de commutation de toutes les solutions

On note que pour $s \in [1.49, 1.85]$ un critère de choix d'angles adéquats est proposé. Ce critère est basé sur la comparaison des THD offerts par les différents angles de cet intervalle. Les angles qui donnent le meilleur THD sont sélectionnés.

La figure 3 représente la tension composée et leur spectre d'harmoniques de l'onduleur asymétrique pour $s = 2.52$. Le spectre d'harmoniques de la tension composée montre que la cinquième et la septième harmonique sont nulles.

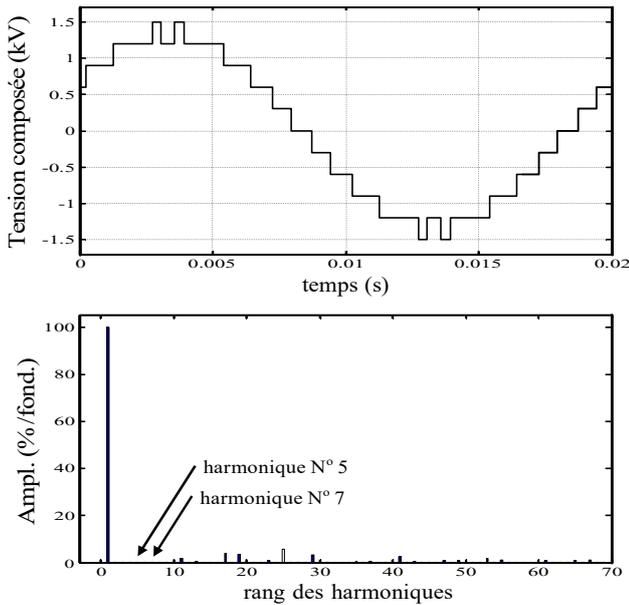


Fig. 3 Tension composée et son spectre d'harmoniques d'un onduleur asymétrique à 7 niveaux commandé par MLIPC ($s = 2.52$)

IV. APPLICATION A LA COMMANDE VECTORIELLE D'UNE MAS

Pour l'entraînement des machines asynchrones à vitesse variable, le type d'alimentation doit être à fréquences et amplitudes variables. Dans cette étude, les performances de la MAS associée à la commande vectorielle indirecte, sont obtenues par l'alimentation d'un onduleur asymétrique à 7 niveaux commandé par MLITS et MLIPC.

Le schéma global de la commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone alimentée par un onduleur asymétrique à 7 niveaux est illustré sur la figure 4.

Les performances de la MAS associée à la commande vectorielle indirecte alimentée par l'onduleur asymétrique à 7 niveaux commandé par MLITS et MLIPC avec application d'un couple résistant à $t = 6s$ sont présentées par les figures 5 et 6

Pour bien évaluer les performances de la machine avec la stratégie MLIPC et bien montrer les améliorations apportées, nous procédons à une comparaison entre les deux stratégies (MLITS et MLIPC). D'après les résultats de simulation, nous pouvons constater que:

- Pour les deux stratégies : les conditions d'orientation du flux sont vérifiées. La composante du flux rotorique sur l'axe d est maintenue constante, et celle en quadrature est nulle ;
- Pour la stratégie MLIPC : l'élimination des harmoniques indésirables 5 et 7 de la tension composée est assurée, la fréquence de commutation est très faible comparés par MLITS et le courant statorique est plus proche de la sinusoïde ;
- Pour la stratégie MLITS : le couple électromagnétique de la machine oscille autour de sa valeur moyenne avec une large bande d'oscillation.

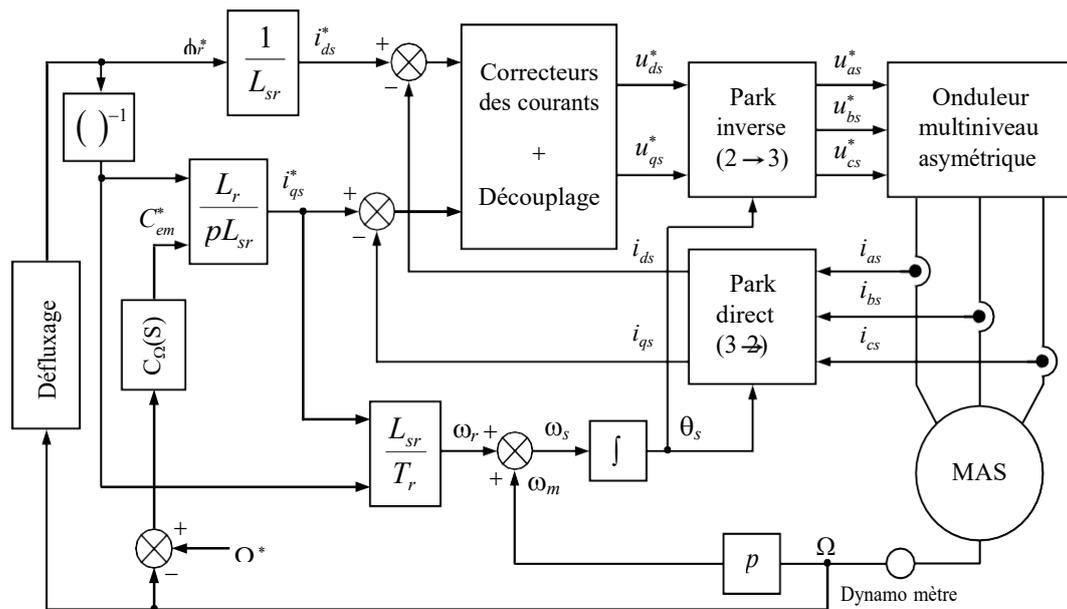


Fig. 4 Schéma de la commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone

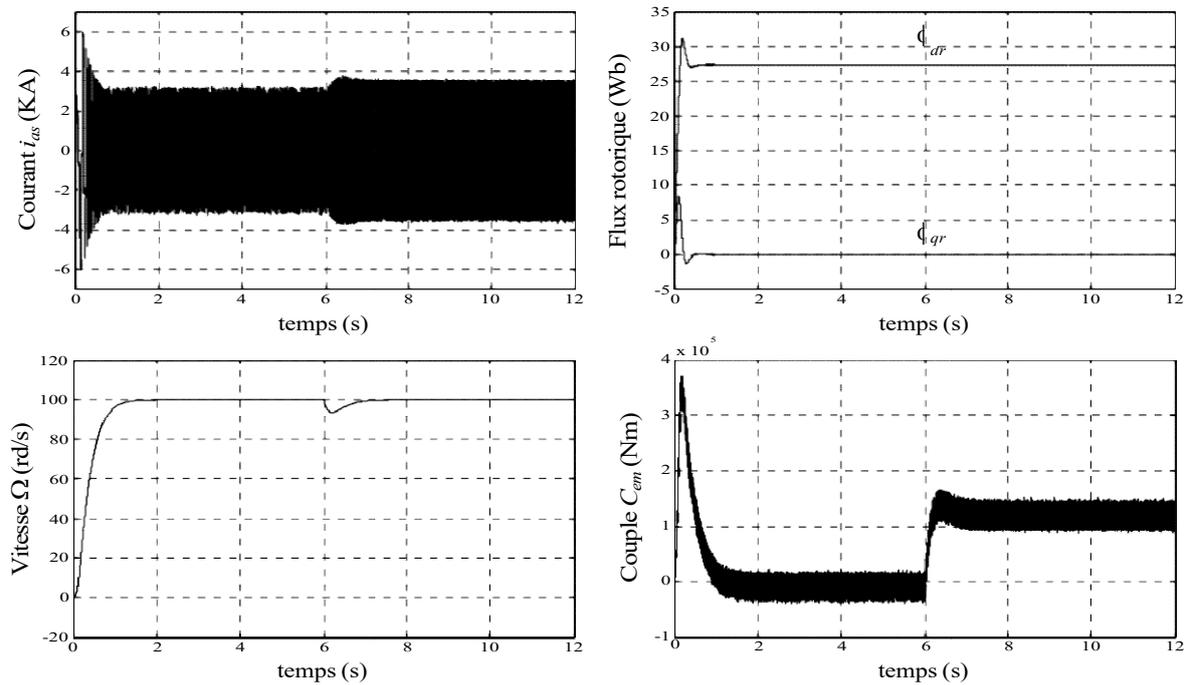


Fig. 5 Performances de la MAS associée à la commande vectorielle indirecte alimentée par un onduleur asymétrique à 7 niveaux commandé par MLITS (indice de modulation = 21)

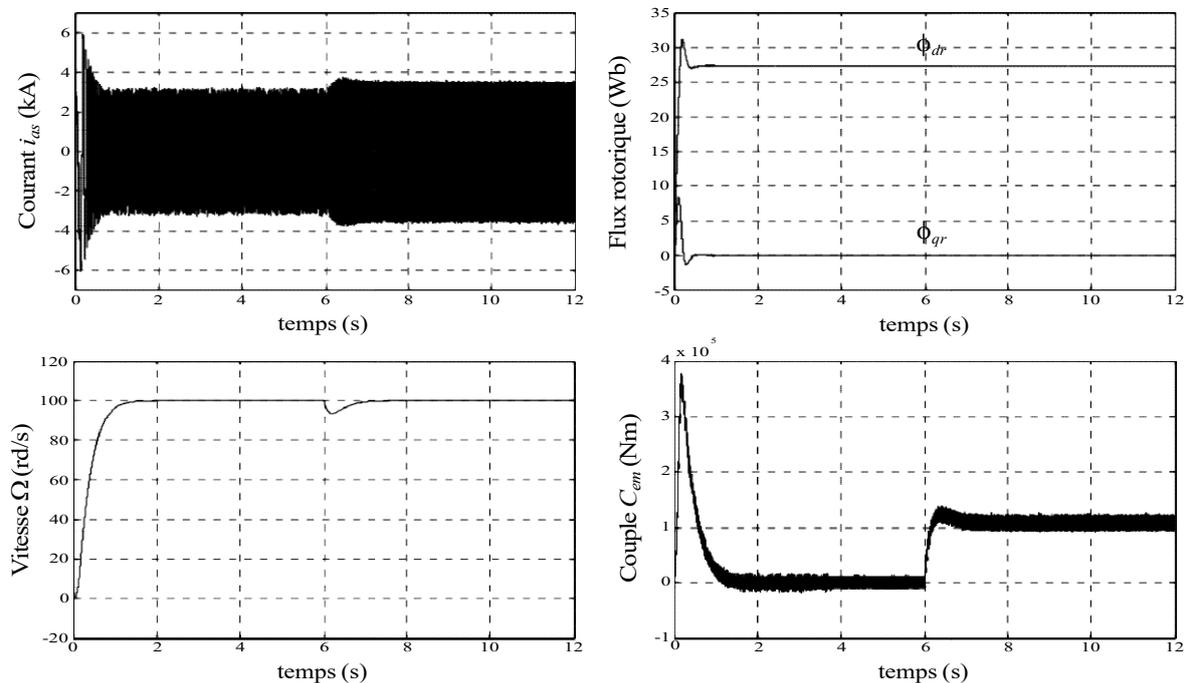


Fig. 6 Performances de la MAS associée à la commande vectorielle indirecte alimentée par un onduleur asymétrique à 7 niveaux commandé par MLIPC ($s = 2.52$)

V. CONCLUSION

L'amélioration des performances d'un système d'entraînement d'une machine asynchrone passe par le choix d'une bonne stratégie de commande de l'onduleur d'alimentation. Dans ce travail, nous avons montré, par simulation, que la stratégie MLI pré-calculée présente des performances meilleures par rapport à celles de la stratégie

MLI triangulo-sinusoidale. En effet, elle permet de garantir une meilleure qualité du couple, d'éliminer les harmoniques de tension et de réduire les pertes de commutation aux bornes des interrupteurs. Ceci a l'avantage d'augmenter leur durée de vie. D'où le choix de cette stratégie dans la commande d'un onduleur multiniveau asymétrique à pas uniforme alimentant une machine asynchrone de forte puissance.

REFERENCES

- [1] J. Rodriguez, S. Bernet, P.K. Steimer, I.E. Lizama, *A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, pp. 2219-2230, July 2010.
- [2] J. Huang, K.A. Corzine, *Extended operation of flying capacitor multilevel inverters*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 1, pp. 140-147, January 2006.
- [3] E. Babaei, *A cascade Multilevel Converter Topology With Reduced Number of Switches*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 6, pp. 2657-2664, November 2008.
- [4] J. Rodriguez, J.S. Lai, F.Z. Peng, *Multilevel inverters : a survey of topologies, control and applications*, IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 49, no. 3, pp. 724-738, August 2002.
- [5] J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro, J.I. Leon, R.C. Portillo, M.M. Prats, M.A. Pérez, *Multilevel converters : An enabling technology for high-power applications*, Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 11, pp. 1786-1817, November 2009.
- [6] J.S. Manguelle, *Convertisseurs multiniveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires basse-fréquence: réactions au réseau d'alimentation*, Thèse de Doctorat, EPF-Lausanne, Suisse, no. 3033, 2004.
- [7] R. Lund, *Multilevel power electronic converters for electrical motor drives*, Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2005.
- [8] F. Bouchafaa, *Etude et commande de différentes cascades à onduler à neuf niveaux à structure NPC : Application à la conduite d'une MSAP*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [9] R. Taleb, D. Benyoucef, M. Helaimi, Z. Boudjema, H. Saidi, *Cascaded H-bridge Asymmetrical Seven-level Inverter Using THIPWM for High Power Induction Motor*, Energy Procedia, Elsevier Ltd, vol. 74, pp. 844-853, 2015.
- [10] R. Taleb, A. Meroufel, A. Massoum, *Control of a Uniform Step Asymmetrical 13-Level Inverter Using Particle Swarm Optimization*, Automatika-Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, vol. 55, no. 1, pp. 79-89, 2014.
- [11] R. Taleb, A. Derrouazin, *USAMI Control with a Higher Order Harmonics Elimination Strategy based on the Resultant Theory*, International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES'14, Beirut, Lebanon, 10-13 April 2014.
- [12] A.A. Bohari, W.M. Utomo, N.M. Zin, S.Y. Sim, R.M. Ariff, *Speed Tracking of Indirect Field Oriented Control Induction Motor Using Neural Network*, Procedia Technology, Elsevier Ltd, vol. 11, pp. 141-146, 2013.