

Etude et réalisation d'un hacheur PWM

Abdelouahab Zaatri^{1*} et Souad Belhour²

¹ Département de Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri, Constantine, Algérie

² Laboratoire de Mécanique, Département de Physique,
Faculté des Sciences, Université Mentouri, Constantine, Algérie

(reçu le 18 Mai 2009 - accepté le 28 Mars 2010)

Résumé - Ce travail présente l'analyse fine d'un asservissement non linéaire par plus – ou - moins à rétroaction via un filtre du premier ordre. Le système étudié est capable de générer une modulation de largeur d'impulsions qui est exploitée pour la conception et la réalisation d'un hacheur PWM (Pulse Width Modulation) destiné à une alimentation fluctuante (photovoltaïque, éolienne,...). L'étude consiste essentiellement à déterminer le lien entre les grandeurs telles que la consigne, l'amplitude de la tension moyenne de sortie, les fréquences de découpage en fonction des paramètres du système et des contraintes technologiques afférentes. L'étude théorique est suivie par une simulation et par la réalisation d'un hacheur expérimental. Des expériences seront présentées pour évaluer la correspondance entre le modèle théorique et les résultats expérimentaux.

Abstract - This paper presents the analysis of a non linear on/off control system using a feedback via a first order filter. The analyzed system is capable of generating a pulse width modulation which is used to design and realize a PWM (Pulse Width Modulation) chopper dedicated to fluctuating power supply (photovoltaic, wind, etc). The study essentially focuses on determining the relationship between quantities such as the set point voltage, the average magnitude of the output voltage, the pulse duration with respect to system parameters and technological requirements. The theoretical study is followed by a simulation and by a realization of an experimental DC/DC chopper. Some Experiments will be presented enabling the evaluation of the correspondence between the theoretical model and experimental results.

Mots clés: Asservissement par plus –ou -moins - Modulation de largeur d'impulsions - Conception de hacheur.

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, les énergies renouvelables regagnent de l'intérêt dans la plupart des pays développés. En effet, ces énergies sont non polluantes, renouvelables, distribuées dans l'espace, et pouvant être collectée et convertie par l'intermédiaire de convertisseurs. Parmi les sources d'énergies renouvelables qui ont connu un grand développement, on peut citer l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne et la biomasse.

Cependant, un des problèmes majeurs concernant la généralisation de l'énergie renouvelable consiste à réduire encore plus le coût des systèmes tout en augmentant leur rendement. Mais si ce premier challenge tient à la technologie de fabrication, il existe un autre problème qui concerne les systèmes d'adaptation de cette énergie en vue de son

* azaatri@yahoo.com _ souad_belhour1@yahoo.fr

exploitation dans différentes applications, telles que le pompage de l'eau, la commande de moteurs électriques, l'éclairage, le chargement de batteries, etc. [1-5].

Il s'agit en particulier de dispositifs de régulation et de conversion de l'énergie dont les convertisseurs DC/DC (hacheurs) et DC/AC (onduleurs). L'intérêt pour ce problème est lié au fait que le rendement de ces dispositifs influence directement le rendement global de l'alimentation dans son ensemble. Les recherches dans le domaine des convertisseurs DC-DC et DC-AC ont révélé depuis plus d'une décennie l'importance des alimentations à découpage.

En effet, l'emploi des transistors de puissance (bipolaire et VMOS) à commutation rapide comme contacteurs statiques dans l'amplificateur de puissance permet de réduire la consommation propre du convertisseur. Cela permet également de travailler à des fréquences de découpage suffisamment élevé facilitant le filtrage des harmoniques et réduisant en conséquence le poids, l'encombrement et le coût du convertisseur.

A cet égard, les convertisseurs à découpage basés sur la technique de modulation de largeur impulsions (PWM) se sont imposées en tant que systèmes viables pour le cas des faibles puissances [5-12]. Le travail proposé dans cet article concerne l'étude fine d'un asservissement par +/- à rétroaction via un filtre du premier ordre.

Le modèle proposé peut se ramener à un problème de commande en temps optimal et peut être, par conséquent, étudié dans le cadre de la théorie du 'principe du maximum', tel qu'établi par Pontriaguine *et al.* [8]. Un tel système est capable de générer une modulation de largeur d'impulsion qui est exploitée pour la conception et la réalisation d'un hacheur à modulation de largeur d'impulsions (PWM). Ce système est exploité dans le contexte des convertisseurs destinés aux alimentations fluctuantes (photovoltaïque, éolienne, etc.), en particulier pour la conception et la réalisation d'un hacheur.

Dans cette étude, il s'agit essentiellement de déterminer le lien entre les grandeurs, telles que la consigne, l'amplitude de la tension moyenne de sortie de l'asservissement, les fréquences de découpage en fonction des paramètres du système et des contraintes technologiques afférentes. Les relations obtenues par l'étude théoriques ont conduit à l'établissement de conditions qui déterminent les performances du système en fonction des paramètres choisis. L'étude théorique est suivie par la simulation et par la réalisation d'un hacheur expérimental. Des expériences seront menées pour évaluer la correspondance théorie pratique.

2. ETUDE THEORIQUE

2.1 Le modèle du hacheur PWM

Le modèle du hacheur PWM proposé est présenté schématiquement à la figure 1. Il peut être ramené à l'étude d'un asservissement par +/- . Ce système comprend dans la chaîne d'action directe l'élément non linéaire par +/- symétrique à hystérésis, noté N . Cet asservissement comprend aussi dans la chaîne de rétroaction un filtre linéaire du premier ordre noté H .

Les grandeurs entrant en jeu sont:

- La grandeur de consigne f_0 supposée constante dans le cas d'un hacheur.
- La grandeur de commande $X(t)$

- La grandeur commandée $U(t)$
- La grandeur asservie $Z(t)$
- la grandeur de sortie $V(t)$

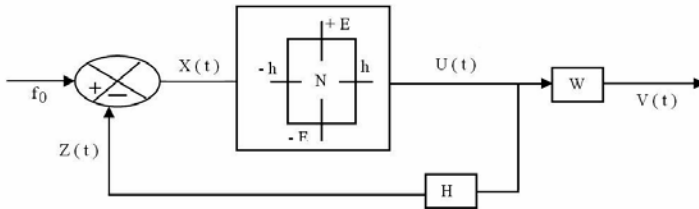


Fig. 1: schéma du système asservi

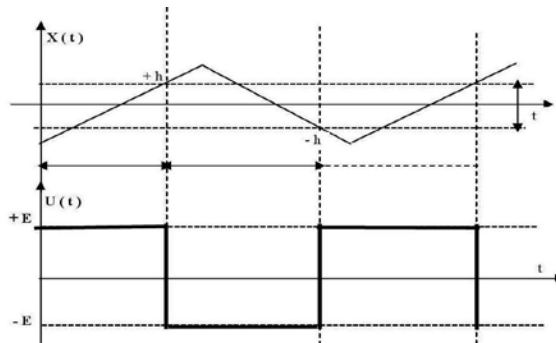
La grandeur de consigne f_0 est comparée à la grandeur asservie $Z(t)$. L'erreur obtenue constitue la grandeur de commande $X(t)$ qui commande l'entrée de l'élément non linéaire N . Le signal $U(t)$ à la sortie de N , est transformé par un filtre linéaire du second ordre, noté W . Ce dernier fournit en sortie la grandeur de sortie $V(t)$ qui sera utilisé par la charge effective.

2.2 Comportement de l'élément non linéaire 'N'

Pour simplifier, on suppose que la tension d'entrée $X(t)$ est de type triangulaire et qu'elle peut franchir les seuils $\mp h$ à des instants précis. La sortie $U(t)$ sera donc une succession d'impulsion d'amplitude constante et de signe alterné, de durées et d'intervalles de répétitions variables. Les instants pendant lesquels $U(t)$ effectuent les sauts sont appelés les instants de commutation, ces instants sont déterminés par les conditions suivantes:

$$\begin{aligned} \text{si } X(t) > +h \quad \text{et} \quad \frac{dX(t)}{dt} > 0 &\Rightarrow U(t) = -E \\ \text{si } X(t) < -h \quad \text{et} \quad \frac{dX(t)}{dt} < 0 &\Rightarrow U(t) = +E \end{aligned} \quad (1)$$

L'évolution du signal de sortie en correspondance avec le signal d'entrée est représentée à la figure 2.

Fig. 2: Les tensions d'entrées et sorties $X(t)$ et $U(t)$

3. DETERMINATION DES INSTANTS DE COMMUTATION

3.1 Etude de système du 1^{er} ordre

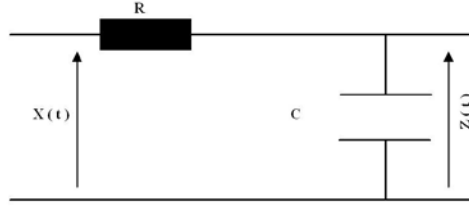


Fig. 3: Filtre passe bas de 1^{er} ordre

La partie linéaire est constituée par le filtre de rétroaction d'entrée $U(t)$ et de sortie $Z(t)$. D'après le fonctionnement du système, on sait que $U(t)$ est une suite d'impulsions prenant alternativement les valeurs $\pm E$. En admettant la continuité par morceaux pour $U(t)$ sur tout intervalle de temps limité par deux instants successifs de commutation t_k et t_{k+1} ($k = 0, 1, 2, \dots, n$), alors la relation d'entrée-sortie du filtre est une équation différentielle de la forme:[13]

$$\tau \cdot \frac{dZ_k}{dt} + Z_k = (-1)^k \cdot E \quad (2)$$

Dans laquelle τ est la constante de temps du filtre, $\tau = RC$.

3.2 Détermination des durées d'impulsions

La détermination des durées d'impulsions ou des instants de commutation est un problème fondamental, lors de l'analyse fine des systèmes par +/- . Dans le cas général, l'obtention d'une solution analytique est fort complexe, voire impossible. Et ce sont surtout les méthodes graphiques ou de simulation qui permettent d'analyser le problème.

Néanmoins, pour le cas que nous envisageons dans cette étude, une solution analytique sera trouvée. Pour ce faire, considérons la partie linéaire qui est constituée par le filtre de rétroaction d'entrée $U(t)$ et de sortie $Z(t)$. En fonctionnement, $U(t)$ est une suite d'impulsion prenant alternativement les valeurs +/- . La détermination des durées d'impulsions aboutit aux expressions (3) et (4).

La durée d'impulsion (ON), notée T_1 est donnée par l'expression (3):

$$T_1 = T_{K+1} - t_K = 2 \cdot \tau \cdot \arg \th \left(\frac{h}{E - f_0} \right) \quad \text{à condition que } h < |E - f_0| \quad (3)$$

La durée d'impulsion (OFF), notée T_2 est donnée par l'expression (3):

$$T_2 = T_{K+1} - t_K = 2 \cdot \tau \cdot \arg \th \left(\frac{h}{E + f_0} \right) \quad \text{à condition que } h < |E + f_0| \quad (4)$$

Ces expressions sont fonction des paramètres du système (h , E , τ) et de la grandeur de consigne f_0 . Il découle de ces résultats que $U(t)$ est un signal périodique de forme rectangulaire, de période $T = T_1 + T_2$, pouvant se mettre sous la forme:

$$T = 2 \cdot \tau \cdot \arg \operatorname{th} \left(\frac{2 h E}{E^2 - f_0^2 + h^2} \right) \quad (5)$$

Les relations (3), (4) et (5) donnant les durées d'impulsions T_1 , T_2 et T en fonction de la consigne f_0 sont représentées dans la figure 9 où elles sont comparées aux résultats expérimentaux.

Commentaires

Les relations (3), (4) et (5) reliant les durées d'impulsions à l'amplitude de la consigne f_0 sont à la base de la PWM. Notons par ailleurs, que la PWM ainsi obtenue est à rapport cyclique variable T_1 / T et à période variable (T). D'autre part, on constate qu'en l'absence de consigne ($f_0 = 0$), le système asservi génère une auto oscillation qui correspond à un signal de forme carré et de période T_0 donnée par la relation suivante:

$$T_0 = 4 \cdot \tau \cdot \arg \operatorname{th} (h / E) \quad (6)$$

De plus, on remarque que cette période est la plus petite période du système et correspond donc inversement à la fréquence maximale que peut produire ce système.

3.3 Détermination de la valeur moyenne $U(t)$

La décomposition du signal asservi $U(t)$ à la sortie de l'élément non linéaire N en série de Fourier donne pour valeur moyenne, l'expression:

$$U_m = E \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 + T_2)} \quad (7)$$

En remplaçant T_1 et T_2 par les expressions trouvées précédemment, on obtient l'expression:

$$U = f_0 \times \frac{\arg \operatorname{th} \left(\frac{2 h E}{E^2 - f_0^2 - h^2} \right)}{\arg \operatorname{th} \left(\frac{2 h E}{E^2 - f_0^2 + h^2} \right)} \quad (8)$$

Cette expression met en évidence la relation entre la valeur moyenne asservie $U(t)$ et la grandeur de consigne f_0 . Cette relation est paramétrée par la grandeur E et la largeur d'hystérésis h . La figure 9 représente la variation de $U(t)$ en fonction de f_0 conformément à l'expression (8). On remarque bien que cette relation est quasi-linéaire

pour ($h \ll E - f_0$). Néanmoins la non linéarité apparaît dès que cette condition n'est plus bien respectée. En approximant au premier ordre $\arg \th(x) \cong x$, on peut écrire:

$$U_m = \left(\frac{E^2 - f_0^2 + h^2}{E^2 - f_0^2 - h^2} \right) \cdot f_0 \quad (9)$$

Expression qui révèle que l'asservissement de, $U(t)$ à f_0 est d'autant efficace que h est négligeable devant la racine carrée de $(E^2 - f_0^2)$, puisque la tension moyenne tend à égaler f_0 . Ceci prouve les capacités d'asservissement du système étudié puisque la tension de sortie moyenne suit pratiquement la valeur de la consigne f_0 .

4. RESULTATS DE SIMULATION

Dans cette section, on présentera quelques résultats de la simulation du système PWM qui a été effectuée à l'aide du logiciel Simulink de Matlab. Dans l'exemple présenté, la simulation a été effectuée pour les paramètres ($h = 0.52, E = 12$). La simulation concernera la variation des durées d'impulsions en fonction de f_0 et de τ .

4.1 Variation de période en fonction de f_0

Dans l'exemple présenté ci-dessus, la simulation a été effectuée avec le paramètre ($\tau = 0.1$), en faisant varier f_0 . On présente les résultats de simulation pour 2 valeurs différentes de la consigne f_0 , (Fig. 4 et 5).

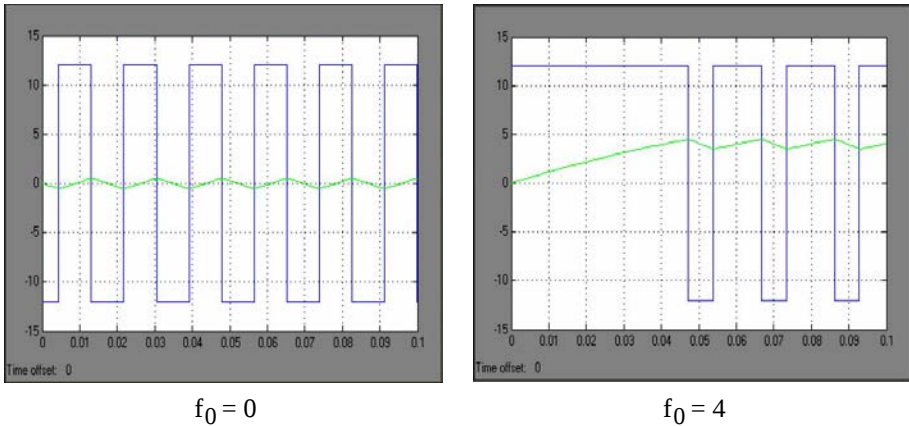


Fig. 4: Durée d'impulsion en fonction de f_0

Commentaires

On remarque que la largeur de T_1 et T_2 change en fonction de la consigne f_0 . Ceci va changer le rapport cyclique α , ($\alpha = T_1/T$), il y a bien donc une modulation de largeur d'impulsion via la commande.

4.2 Variation de période en fonction de τ

Lorsqu'on fait varier la constante du temps τ en fixant f_0 , on obtient les résultats suivants qui sont visualisés par la simulation et ceci pour 2 valeurs différentes de la constante de temps τ , (Fig. 5).

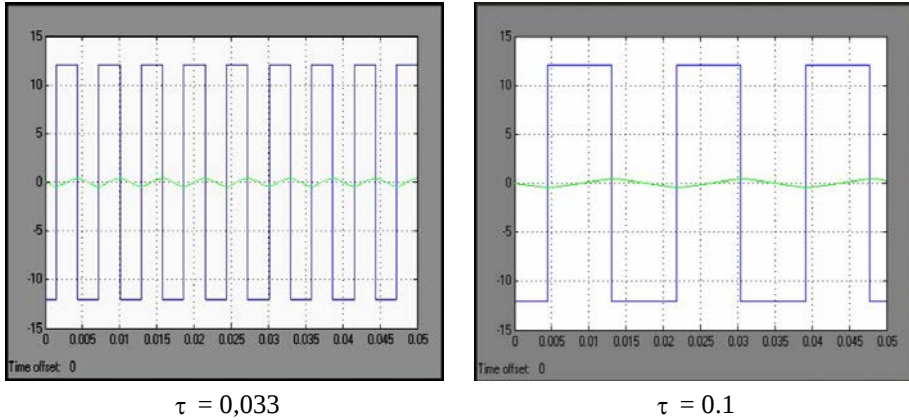


Fig. 5: Durée d'impulsion en fonction de τ

5. REALISATION DU HACHEUR PWM

5.1 Relation du système étudié avec les alimentations à découpage

Le système d'asservissement étudié est exploité en vue de concevoir et réaliser des alimentations à découpage. Dans le cas de l'application envisagée ici, il s'agit, précisément, de concevoir un régulateur de tension DC-DC ou hacheur qui permette de réguler la tension que l'on doit délivrer à une charge donnée malgré les fluctuations de la tension provenant des sources d'énergies fluctuantes comme les énergies renouvelables.

La correspondance entre l'étude présentée et le hacheur PWM envisagé s'interprète comme suit. La grandeur E qui apparaît dans les différentes expressions précédentes correspond à la tension délivrée par exemple par un panneau photovoltaïque qui dépend de l'ensoleillement, de la température et d'autres facteurs [1]. Elle est donc, en général fluctuante et c'est une tension qui doit être régulée avant de pouvoir alimenter les charges.

V est la tension effective qui s'applique réellement à la charge utile (moteur, pompe, batterie, etc.). Celle-ci est composée par la superposition de la tension moyenne U_m et des harmoniques qui sont plus ou moins filtrées par le filtre du second ordre. f_0 est la grandeur de consigne.

Les autres paramètres qui interviennent dans le dimensionnement de l'onduleur PWM restent la largeur d'hystérésis h_2 , la constante de temps du filtre du premier ordre τ , ainsi que les paramètres du filtre du second ordre (self L , capacité C). Les grandeurs h et τ interviennent dans la détermination des fréquences de découpage T_1 , T_2 et T . Ils ont aussi pour effet de fixer en conséquence U_m . Le filtre du second ordre de sortie, permet de filtrer les harmoniques associées à V pour extraire

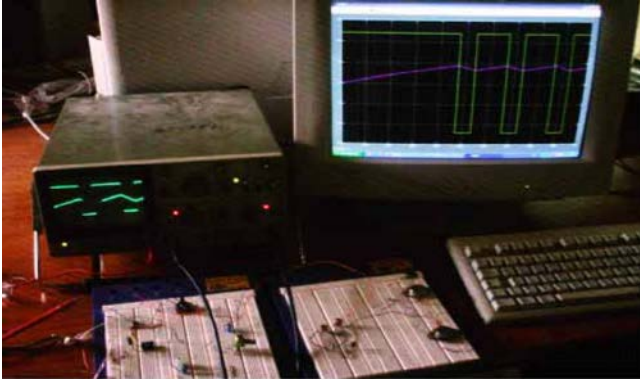


Fig. 7: Système expérimental

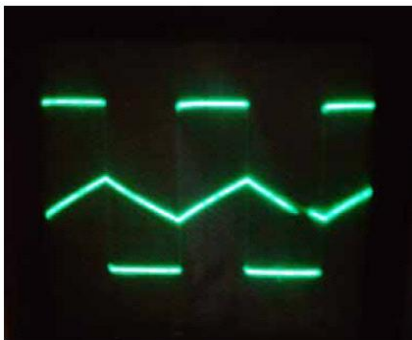
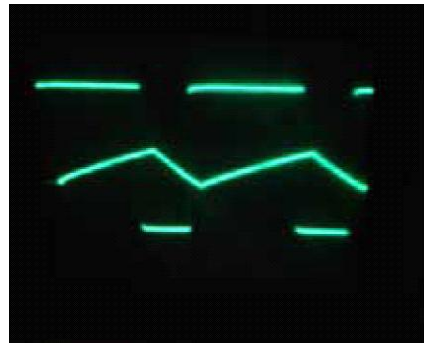
6. ESSAIS ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

Dans cette section, on présentera quelques résultats expérimentaux et on cherche à valider la théorie établie. Trois séries d'expériences seront présentées. La première concerne la vérification expérimentale des expressions liant les durées d'impulsions à la grandeur de consigne f_0 .

La deuxième série d'expériences concerne la vérification expérimentale de U_m en fonction de f_0 . La troisième consigne consiste à étudier expérimentalement comment la tension de sortie V varie lorsque la charge varie.

6.1 Essais

Comme pour la simulation, des essais expérimentaux ont été effectués en vue de valider les relations théoriques T_1 , T_2 et T qui relient les durées d'impulsions en fonction de f_0 et de τ . La figure 8 présente des chronogrammes pris directement sur l'oscilloscope qui montrent que les durées d'impulsions T_1 , T_2 et T changent de valeur chaque fois qu'il y a variation de la consigne; d'où la modulation de largeur d'impulsions.

 $f_0 = 0$  $f_0 = 4$ Fig. 8: Images de l'oscilloscope montrant $U(t)$ et $Z(t)$

6.2 Etude de la fréquence de découpage en fonction de f_0

Cette première série d'expériences consiste à valider les relations théoriques (3), (4) et (5) qui relient les durées d'impulsions en fonction de f_0 . Cette série d'expériences consistait à faire varier f_0 et à mesurer T_1 , T_2 et T . Les résultats expérimentaux obtenus sont représentés graphiquement sur la figure 9. Dans cette figure, nous avons superposé les points expérimentaux et les courbes donnés par les expressions théoriques. On peut identifier, sur cette figure, la courbe qui correspond à l'expression théorique (3) donnant T_1 en fonction de f_0 . Les mesures expérimentales correspondantes sont représentées par les ensembles de points T_{1X} . On peut aussi identifier la courbe correspondant à l'expression théorique (4) exprimant T_2 en fonction de f_0 .

Les mesures expérimentales correspondantes sont représentées par T_{2X} . La troisième courbe est l'addition des deux premières et correspond à la période totale en fonction de f_0 et correspondant à l'expression théorique (5). Les mesures expérimentales correspondantes sont représentées par T_X . De la comparaison des résultats théoriques aux résultats expérimentaux, il ressort, qu'il y a une excellente concordance entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux et ce pour T_1 , T_2 et T . Cependant, la concordance peut diminuer lorsque f_0 atteint des valeurs comparables à E , ceci s'explique par le fait que l'on s'écarte de la condition de validité $h \ll (E - f_0)$. Dans notre cas, on choisit $E = 20$ volts.

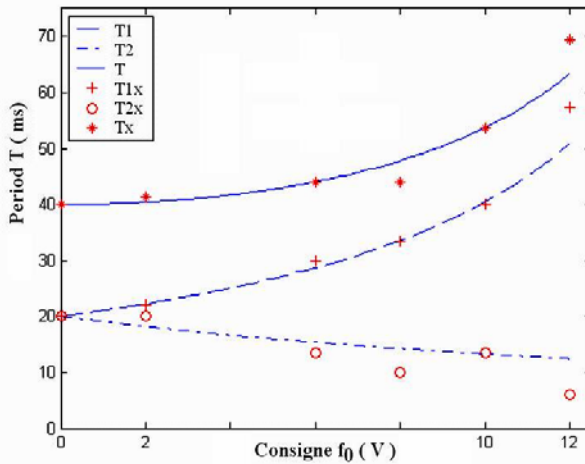


Fig. 9: Durées d'impulsions en fonction de f_0

6.3 Etude de la tension de sortie V en fonction de f_0

Dans cette série d'expériences, on cherche à déterminer la relation expérimentale entre la tension de sortie V et la consigne f_0 tout en maintenant la valeur de la charge fixe. Cette charge est choisie de type purement résistif. La figure 10 montre en traits

continus la relation obtenue théoriquement qui relie V à f_0 . On constate qu'il s'agit d'une relation linéaire mais qui s'écarte de la linéarité dès que h devient comparable à $E - f_0$. Les résultats expérimentaux obtenus sont superposés sur le graphe de la figure 10. On constate que l'on a une correspondance, telle que prévue par la théorie {Eq. (8)}.

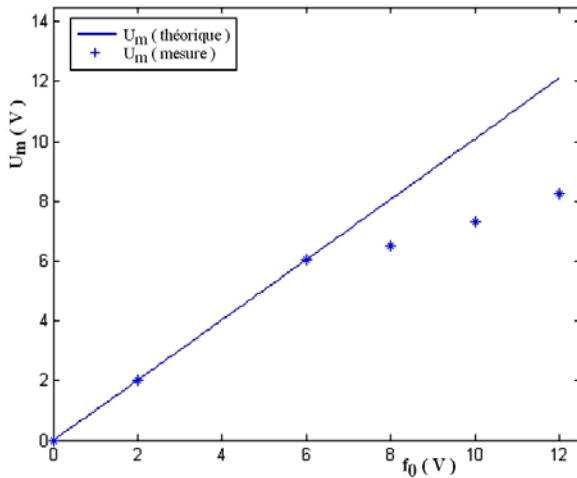


Fig. 10: Tension moyenne en fonction de f_0

7. CONCLUSION

Nous avons présenté l'étude fine d'un asservissement par +/- à rétroaction via un filtre du premier ordre. Le système étudié est capable de générer une modulation de largeur d'impulsions (PWM) de durée et de rapport cyclique variables. Cette étude théorique a permis de relier analytiquement les durées d'impulsions à la grandeur de commande f_0 , ainsi qu'aux différents paramètres intervenant dans la réalisation du système asservi. Elle a également permis de déterminer la tension moyenne asservie U_m en fonction de f_0 .

Ces relations résultant de l'étude théorique ont permis à leur tour de dimensionner un hacheur destiné à une alimentation photovoltaïque. On notera aussi que ce système correspond au cas de la commande en temps optimal telle que développée par Pontriaguine.

Cette étude fut suivie par la simulation et la réalisation expérimentale d'un hacheur PWM. Les expériences menées avec ce dispositif ont permis de valider les résultats théoriques et de montrer les limites des hypothèses admises pour notre modèle.

D'autres perspectives sont potentiellement disponibles telles que la possibilité de régulation en tenant compte des variations de la charge et la possibilité d'utiliser ce système en tant qu'onduleur.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les étudiants MM Adjeroud Walid et Ben Rouibah Abdelmoumen pour la réalisation expérimentale du hacheur.

REFERENCES

- [1] H. Wilk, 'Inverters for Photovoltaic System', In. 'Photovoltaic Systems', Comett-Book, Fraunhofer-ISE, Freiburg, Germany, 1995.
- [2] M. Yantsch and C.W.G. Verhoere, 'Inverters with Three Phase Output and Without Electrolyte Capacitor for Improved Lifetime, Efficiency and Costs of Grid Connected Systems', P7B.6, 14th EC PVSEC Barcelona, Spain, 1997.
- [3] D. Grant, G. Hearn, W. Maggs and I. Gonzalez, 'An Electrostatic Charge Meter Using a Microcontroller Offers Advanced Features and Easier ATEX Certification', Journal of Electrostatics, Vol. 67, N°2-3, pp. 473 – 476, 2009.
- [4] A. Eida, M. Abdel-Salam, H. El-Kishky and T. El-Mohandes, 'Simulation and Transient Analysis of Conventional and Advanced Aircraft Electric Power Systems with Harmonics Mitigation', Electric Power Systems Research, Vol. 79, N°4, pp. 660 – 668, 2009.
- [5] R. Akkaya and A.A. Kulaksiz, 'A Microcontroller-Based Stand-Alone Photovoltaic Power System for Residential Appliances', Applied Energy, Vol. 78, N°4, pp. 419 – 431, 2004.
- [6] F. Barone, 'Future Developments of Inverters', Proceedings of Seminar on Lead Acid Batteries, Sydney, 16-17th November, 1992.
- [7] J.A. Gow and C.D. Manning, 'Photovoltaic Converter System Suitable for Use in Small Scale Stand Alone or Grid Connected Applications', IEE Proceedings-Electric Power Applications, Vol. 147, N°6, pp. 535 – 543, 2000.
- [8] L.S. Pontriaguine, L. Boltianski and V. Gamkrelidze, 'Théorie Mathématique des Processus Optimaux', Editions MIR, Moscou, 1978.
- [9] A. Maalouf, 'Commande Numérique d'un Alterno-Démarreur Synchrone à Trois Etages en Mode Générateur', JCGE'08, Lyon, 16 et 17 Décembre 2008.
- [10] K. Gorecki, 'Non-Linear Average Electrothermal Models of Buck and Boost Converters for SPICE', Microelectronics and Reliability, Vol. 49, N°4, pp. 431 – 437, 2009.
- [11] S. Banerjee, D. Prasad and J. Pal, 'Design, Implementation, and Testing of a Single Axis Levitation System for the Suspension of a Platform', ISA Transactions, Vol. 46, N°2, pp. 239 – 246, 2007.
- [12] M.H. Ali, M. Park, I.K. Yu, T. Murata, J. Tamura and W. Bin, 'Enhancement of Transient Stability by Fuzzy Logic-Controlled SMES Considering Communication Delay', Electrical Power and Energy Systems, Vol. 31, N°7-8, pp. 402 – 408, 2009.
- [13] A. Zaatri and T. Kerbach, 'Design of DC-DC PWM Converter Dedicated for a Photovoltaic System', World Renewable Energy Congress VII (WREC-2002), Cologne, Germany, 22 June – 5 July, 2002.