

## CONTRIBUTION À LA COMMANDE NUMÉRIQUE BANG-BANG D'UN MOTEUR LINÉAIRE À RÉLUCTANCE VARIABLE (MLRV) PAR DSPIC

Ovidiu RADU<sup>1</sup>, Cristina CARPEN<sup>2</sup>

*Acest articol propune un studiu cu privire la comanda Bang Bang sau comanda pas cu pas a unui Motor Liniar cu Reluctanță Variabilă. Acest tip de comandă oferă posibilitatea de a determina inductanța circuitului. Prin simulări și încercări experimentale s-au obținut caracteristicile îmbunătățite ale motorului studiat.*

*Cet article propose une étude sur la commande Bang Bang ou la commande pas à pas d'un Moteur Linéaire à Reluctance Variable. Ce type de commande permet de déterminer l'inductance du circuit. Par des simulations et des essais expérimentaux ont été obtenus des caractéristiques améliorées du moteur étudié.*

*This article proposes a study on the Bang-Bang command or step by step command of a Variable Linear Reluctance Motor. This type of command offers the possibility to determine the circuit inductance. By simulations and experimental tests were obtained improved characteristics of the motor studied.*

**Mots clés :** moteur linéaire à reluctance variable, commande Bang Bang, inductance, caractéristiques

### 1. Introduction

Le moteur linéaire à reluctance variable qui se trouve dans le laboratoire du Centre de Recherche en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (CReSTIC), Reims, a été construit en Brésil. Pour ce moteur on a essayé des commandes différentes, ainsi qu'en Boucle Fermée. L'étude d'erreur de mesure d'inductance [1], la modélisation et la simulation dynamique, l'analyse

---

<sup>1</sup> Prof., Faculté d'Électronique et Télécommunications, Université Polytechnique de Bucarest, Roumanie, e-mail: ovidiu.radu@elia.pub.ro

<sup>2</sup> Universitaire supérieur, Faculté d'Électronique et Télécommunications, Université Polytechnique de Bucarest, Roumanie

des Phénomènes non linéaires dans la région Arrêt/Démarrage sont aussi des études qu'ont été faite sur le moteur [2].

Les objectifs de travail sont d'effectuer une commande simple pour déterminer l'alimentation [3], la détection de pas et la détection de sens : marche avant ou marche arrière. Ce type de commande est appelée Bang Bang et la nouveauté que la commande apporte est qu'on peut déterminer en même temps l'inductance. Un autre objectif est l'obtention des caractéristiques des courants de la position et de la vitesse, sans oscillations.

## 2. Étude de l'alimentation

Il est possible de récupérer tout ou une partie d'énergie sans structure en pont, en insérant chaque phase en série avec deux interrupteurs, selon la figure 1 qui correspond au cas d'une machine triphasée. Elle présente l'avantage de protéger les interrupteurs contre le court-circuit franc d'un bras comme cela peut se produire dans un bras de pont d'onduleur. Les interrupteurs de type bipolaire, MOS ou IGBT selon les puissances mises en jeu et les fréquences de travail, sont munies de circuits classiques d'aide à la commutation qui diminuent les contraintes sur les interrupteurs et imposent la constante de temps d'excitation du courant dans la phase [4].

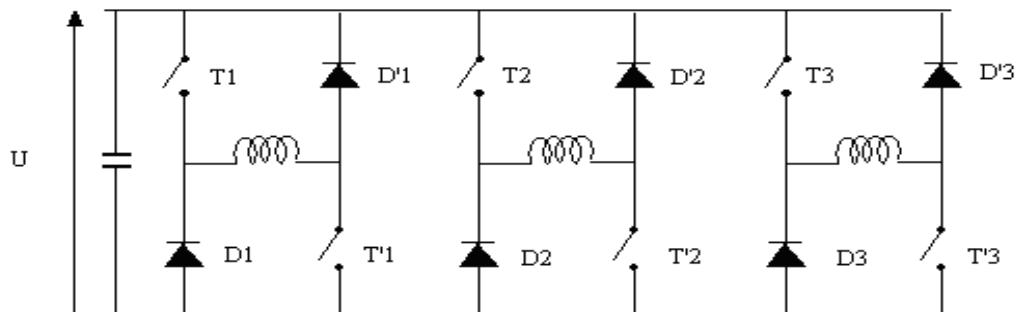


Fig. 1. Alimentation avec récupération

L'alimentation de la phase se fait par fermeture et ouverture simultanée des deux interrupteurs au début et en fin d'un pas [5]. Pendant celui-ci, pour maintenir le courant pratiquement constant,  $T_1$  et  $T'1$  hachent le courant grâce à une boucle à hystérésis.

La structure générale de la commande de ces machines comprend une boucle de courant, limitant celui-ci, une boucle de vitesse et la logique de commande avec ou sans autopilotage [6]. Si le schéma d'alimentation de la figure 1 sert de référence, on peut dire que la logique de commande ferme les commutateurs  $T_1, T_2, T_3$  et une logique élaborant la MLI pilote les commutateurs  $T'_1, T'_2, T'_3$  pour le hachage du courant.

### 3. Le principe de mesure de l'inductance par le courant sur les phases du moteur

La mesure en ligne de l'inductance pour contrôler la position et la vitesse des moteurs à reluctance variable est une solution pour éviter l'utilisation des encodeurs optique qui sont très chers et au même temps profiter de la caractéristique magnétique du moteur qui garde l'information de position et vitesse sur la valeur du flux [7].

Actuellement, avec les microcontrôleurs DSP, capables de faire millions de calculs par seconde ce méthode peut être utilisé avec beaucoup de efficacité et plus de précision. Le principe de mesure indirecte de la position commence par l'analyse de l'équation de la phase du moteur à reluctance variable qui est l'objet de cette étude:

$$\lambda(\theta, i_n) = \int (v_n - R i_n) dt, \quad (1)$$

soit  $\lambda$ ,  $v_n$  et  $i_n$ , le flux total, la tension appliquée sur la phase  $n$  et le courant dans la phase du moteur. Donc, est claire que pour extraire l'information de la position il faut connaître la fonction inverse du flux.

$$\theta \Leftarrow \lambda^{-1}(\lambda, i_n) \quad (2)$$

Comme le flux est une fonction de la position et au même temps du courant sur la phase, l'équation (1) peut être modifiée, (3).

$$v_n = R i_n + \frac{d\lambda}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\lambda}{di_n} \cdot \frac{di_n}{dt} \quad (3)$$

Dans ce travail le flux a été modélisé à travers d'un modèle d'inductance. Ce modèle d'inductance, à principe, doit être aussi une fonction de la position et du courant sur la phase.

$$\lambda = L(\theta, i_n) \cdot i_n \quad (4)$$

Donc, en substituant (4) dans (3) :

$$v_n = R.i_n + i_n \cdot \frac{\partial L_n}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + i_n \frac{\partial L_n}{\partial i} \cdot \frac{di_n}{dt} + L_n \cdot \frac{di_n}{dt} \quad (5)$$

Si on considère l'inexistence de saturation du flux, où soit, l'indépendance de l'inductance avec le courant, l'équation (5) peut être écrit comme (6). Cette considération peut être justifié sur la condition que la plupart des calculs d'inductance sont fait sur la région désaligné entre le pole du stator et translateur.

$$v_n = R.i_n + i_n \cdot \frac{\partial L_n}{\partial \theta} \cdot \omega + L_n \cdot \frac{di_n}{dt} \quad (6)$$

Le deuxième terme à droit de l'équation représente la réaction à variation de la reluctance. Cette terme ne peut pas être mesuré pour la forme de curen, donc il faut trouver une façon d'estimer ou annulé ce terme ou bien, si serais le case, négliger [8].

L'équation (6) peut être écrite comme (7) :

$$\frac{di_n}{dt} \cdot L_n = v_n - R.i_n - i_n \cdot \frac{dL_n}{dt} \quad (7)$$

Pour un driver réversible avec tension haché, quand :  $v_n = +E$ ,

on obtient :

$$\left. \frac{di_n}{dt} \right|_{t1} \cdot L_n^+ = E - R.i_n^+ - i_n^+ \cdot \frac{dL_n^+}{dt} \quad (8)$$

Dans la situation quand,  $v_n = -E$ ,

on obtient :

$$\left. \frac{di_n}{dt} \right|_{t2} \cdot L_n^- = -E - R.i_n^- - i_n^- \cdot \frac{dL_n^-}{dt} \quad (9)$$

Si on fait la différence entre (8) et (9) et en considérant l'invariance de courant moyen et aussi d'inductance sur une période de commutation du courant haché  $[t1 \ t2]$ , soit :

$$\begin{aligned} L_n^- &= L_n^+ \\ i_n^- &= i_n^+ \end{aligned} \quad (10)$$

L'hypothèse (10) est valide parce que la période de commutation est très faible.

On obtient :

$$\left. \frac{di_n}{dt} \right|_{t_1} \cdot L_n^+ - \left. \frac{di_n}{dt} \right|_{t_2} \cdot L_n^- = 2 \cdot E \quad (11)$$

En la pratique les valeurs de l'inductance peuvent être calculées par (12)

$$L_n = \frac{2 \cdot E}{\left. \frac{di_n}{dt} \right|_{t_1} - \left. \frac{di_n}{dt} \right|_{t_2}} \quad (12)$$

Le courant du moteur est donnée par un hacheur de courant à hystérésis [9]. Il a une forme triangulaire parce que la fréquence élevée, comme montre la figure ci-dessous. La mesure des dérivés est pour les temps  $t_1$  et  $t_2$ . La mesure des dérivés sont réalisés pendant toute la durée du déplacement.

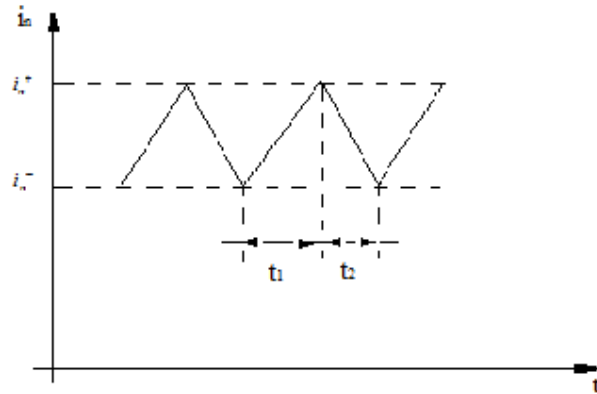


Fig. 2. Mesure des dérivés du courant

#### 4. La commande Bang Bang

Les équipements qui se trouvent sur le banc d'essai sont représenté dans la figure 3 [10] :

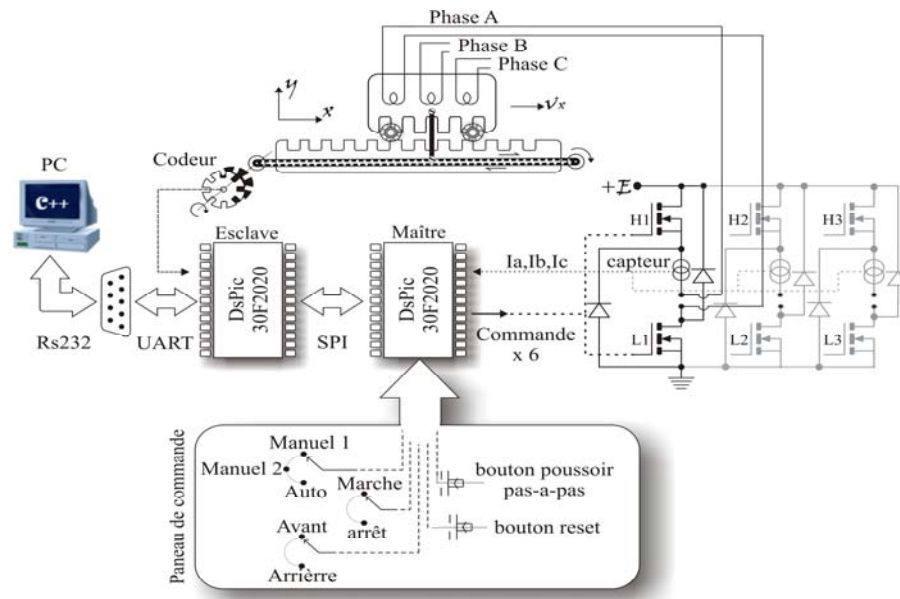


Fig. 3 – Le banc d'essai

#### 4.1 Le principe de fonctionnement

On envoie le programme sur la carte hacheur à l'aide d'ordinateur [11]. Première fois la 1ère phase est alimentée. Quand le moteur est en état de fonctionnement marche, on appuie le bouton poussoir pas-à-pas qui est sur le panneau de commande et le moteur fait un pas avant, la 2ème phase est alimentée; on appuie encore une fois le bouton poussoir pas-à-pas et le moteur freine, par arrière, la 3ème phase est alimentée; on appuie encore une fois le bouton et le moteur fait un pas avant.

Le principe de fonctionnement de la commande Bang Bang est :

- l'alimentation de première phase
- la détection de pas
- la détection de sens : marche avant ou marche arrière

Pour commander le moteur, on utilise le dsPIC30F1010/2020. Le programme est écrit in C++ et mis en œuvre avec MPLAB. La nouveauté que le programme apporte est qu'on peut déterminer l'inductance sans calculer les paramètres qui apparaissent dans la relation 12. Le programme d'acquisition de données peut

afficher la variation d'inductance, comme la figure 4. L'obtention d'une caractéristique d'inductance sans oscillations implique l'obtention des caractéristiques du courant, de la vitesse et de la positions sans oscillations. C'est ce que le programme vise.

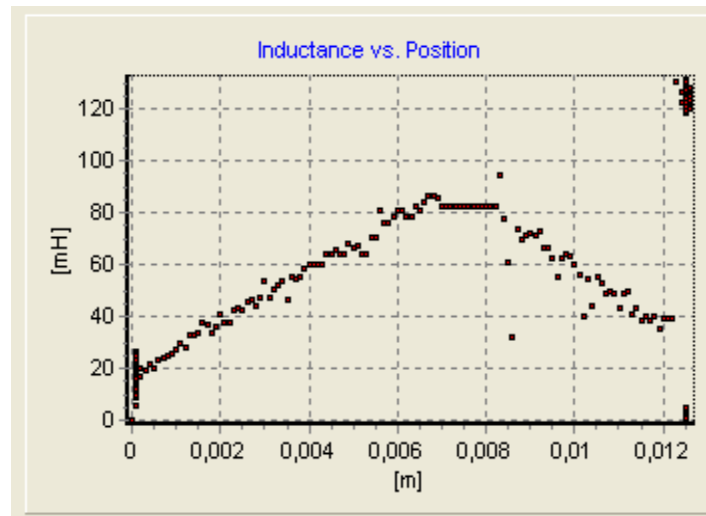


Fig. 4- La mesure d'inductance

- le calcul d'inductance

```
void Calc_L(void)
{
    L3=__builtin_muluu(T1,T2);
    L2=T1+T2;
    if(L2>0) {
        Lind=__builtin_divud(L3,L2);
        SPI1BUF=Lind; }
}
```

Les paramètres pour le moment de déclenchement de l'accélération et pour le moment de déclenchement de freinage,  $T_a$  et  $T_d$  sont déterminés pour chaque phase par des essais jusqu'à ce qu'on obtienne une caractéristique position- temps proche de l'équilibre, sans oscillation. Les caractéristiques des courants sur les trois phases, de la position et de la vitesse sont présentées sur les figures 5, 6 et

7. Le fonctionnement du moteur commence par l'alimentation de la première phase. La commande de freinage assure l'alimentation de la deuxième phase, c'est-à-dire le front descendant du courant de la première phase chevauchement avec le front ascendant du courant de la deuxième phase. Pour maintenir le couple, la vitesse nulle, ( $v=0$ ), le courant de la phase est différent de zero, comme montre la figure 6.

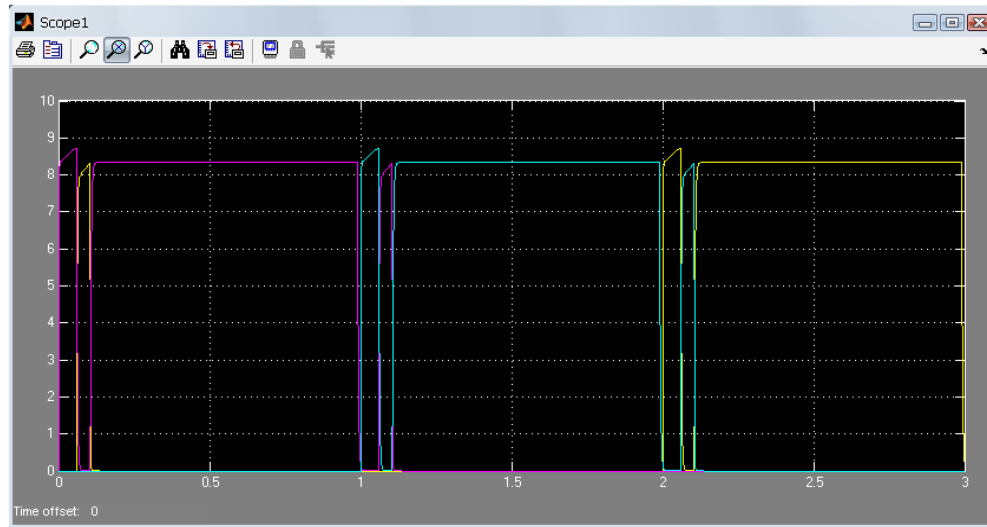


Fig. 5 - Les caractéristiques des courants sur les trois phases

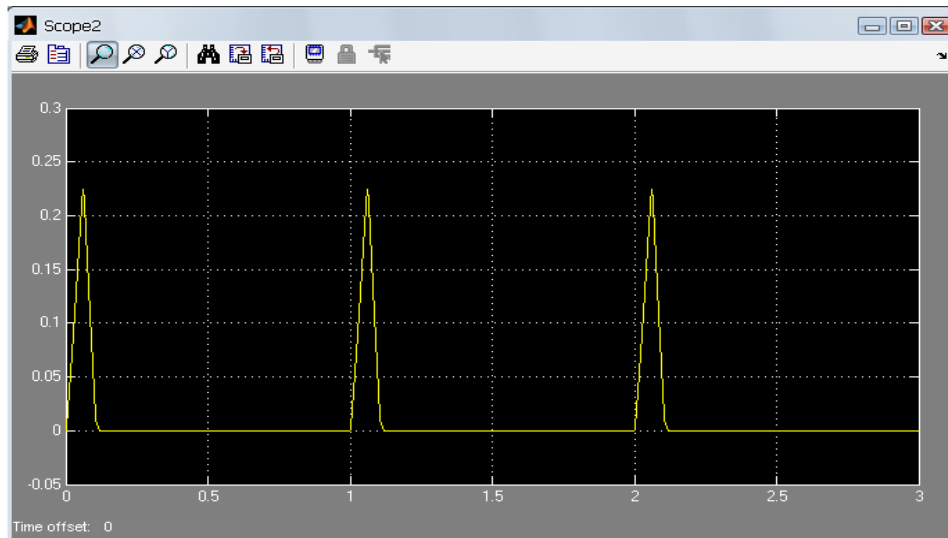


Fig. 6 - La caractéristique de la vitesse



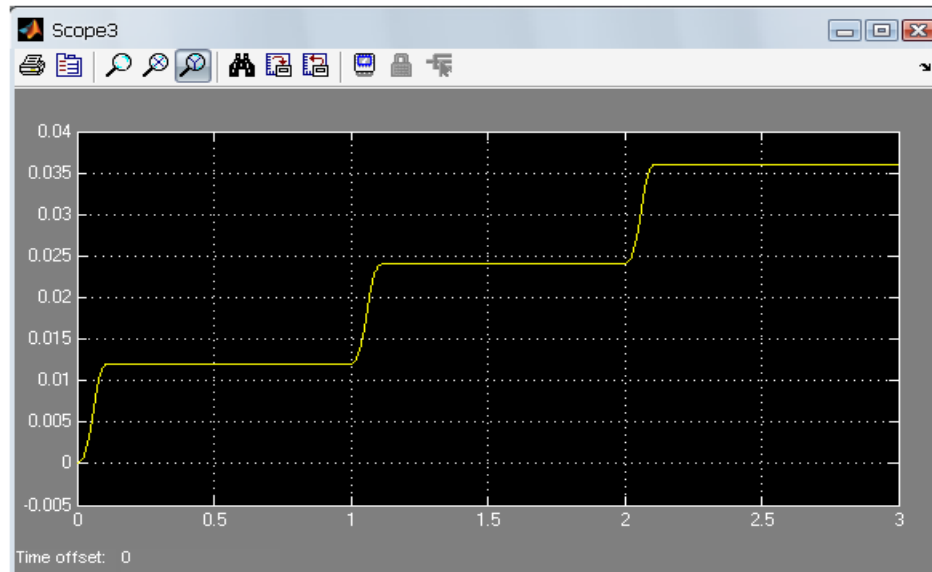


Fig. 7 - La caractéristique de la position

## 5. Conclusions

La commande numérique Bang- Bang du moteur linéaire à réluctance variable (MLRV) est très connue parce qu'elle est utilisée pour commander avec une grande précision le déplacement et la position d'un objet [12]. Le microcontrôleur qu'on utilise offre des multiples possibilités de commander le moteur. La nouveauté que la commande apporte est qu'on peut déterminer l'inductance. Les caractéristiques de la vitesse, de la position et du courant ont été obtenus en Simulink.

Les contributions apportées à cet article sont :

- élimination des oscillations ;
- le calcul d'inductance ;
- le programme de la commande Bang Bang.

Les paramètres  $T_a$  et  $T_d$  sont obtenus par des essais expérimentaux, pour chaque phase, jusqu'à ce que les caractéristiques soient sans oscillations. Dans le code du programme les valeurs du temps accélérateur et du temps deaccélérateur sont utilisées comme une matrice. Les valeurs des temps ont une grande influence sur le calcul de l'inductance.

Un inconvénient du moteur étudié est que dans deux parties du stator il y a un entrefer plus petit, c'est-à-dire la force qui actionne sur chaque phase est grande et le temps d'accélération est plus petit.

## BIBLIOGRAPHIE

1. *Guy Grellet, Guy Clerc*, Actionneur Electrique, France, Eyrolles, 1996
2. *T. L. Skvarenina*, Power Electronics Handbook, CRC Press, USA, 2002
3. *K. Venkataraman*, Special Electrical Machines, CRC Press, USA, 2008
4. *V. Tietze, Ch. Shenk*, Electronic Circuits, Springer, Germany, 2008
5. *F.L. Luo, M.H. Rachid*, Digital power electronics and applications, BURLINGTON, M. A., Elsvise Academic Press, 2005
6. *J. Boldea*, Reluctance synchronous machines and drives, Claderon Press, Oxford, UK, 1996
7. *P.N. Kumar, T.B. Isha*, Inductance calculation of switched reluctance motor, IEEE Power, India Conference, 12-15 October, 2008, pp. 1-5
8. *F.M. Sargos, P. Zaskaliky, E.I. Gudefin*, Structures theory of reluctance step motors, IEEE Industry Applications Magazine, **Vol. 1**, no. 3, pp. 28-32, May- June 1995
9. *H-Kung, P. Krishnan*, A linear switched reluctance motor: converter control, IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, pp. 138-404
10. *G. Wan-Chuen, C.C. Noorbert*, Design of a linear switched reluctance motor for high precision applications, IEMD 2001 IEEE International, pp. 701-702, USA
11. *A. Kelemen, C. Imes, R. Morshalco, C. Rusu*, Torque and speed control systems for PM hybrid stepping motor, ICEMA, Adelaida, Australia, **Vol. 3**, pp. 505-512, 13-15 September, 1999
12. *K. Biro, I.A. Viorel, L. Szabo, G. Henneberger*, Masini electrice speciale, Editura Meridiane, Cluj-Napoca, 2009
13. *C.K. Tise*, Complex behavior of switching power converter, CRC Press, USA, 2003
14. *A. Viorel, L. Szabo*, Hybrid linear stepper motors, Editura Meridiane, Cluj-Napoca, 1998
15. *U.S. Deshpande, J.J. Cathey, Richter*, High-force density linear switched reluctance machine, Industry Applications Society Annual Meeting, 1993.