

# MISE EN ŒUVRE DE LA CONDUCTION CONTINUE POUR LA COMMANDE DE LA MACHINE A RELUCTANCE VARIABLE

*Hala Hannoun, Mickaël Hilairet, Claude Marchand*

*Laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGEP) / SPEE-Labs,*

*CNRS UMR 8507; SUPELEC; Université Pierre et Marie Curie P6; Université Paris-Sud 11;*

*11 rue Curie, Plateau de Moulon F91192 Gif sur Yvette CEDEX*

Email : (mickael.hilairet,claudemarchand)@lgep.supelec.fr

## **Résumé**

Cette étude concerne la commande en vitesse d'une Machine à Réductance Variable (MRV). La stratégie proposée permet de passer du mode de conduction discontinue habituel au mode de conduction continue selon le point de fonctionnement désiré. L'avantage de ce nouveau mode est de maintenir une puissance maximale constante sur une large plage de vitesses. Cet objectif est recherché dans de nombreuses applications parmi lesquelles la traction électrique, et rend la MRV comparable aux machines alternatives sans la contrainte de réduction du flux aux hautes vitesses.

## **Abstract**

This study presents a speed controller for a switched reluctance machine (SRM). The proposed strategy was first designed to control the torque in discontinuous conduction mode and then extended to operate in continuous conduction mode as well. The main advantage of this mode is to maintain a constant maximum power over a wide speed range. This objective is sought in many applications including electric traction, and makes SRM comparable with alternative machines, without the field weakening drawback.

**Mots clés :** Machine à réductance variable, conduction continue et discontinue, commande en vitesse.

## **I. Introduction**

Aujourd'hui, les machines asynchrones ou à aimants permanents sont largement considérées comme les machines les mieux adaptées à la propulsion électrique des véhicules électriques ou hybrides pour leur fiabilité, leur robustesse, leur faible entretien et capacité à fonctionner dans des environnements hostiles. Ces machines sont les plus matures entre les diverses technologies de moteurs sans contact : machine asynchrone, synchrone ou à réductance variable. Toutefois, l'utilisation de la machine à aimants est plus délicate, en particulier lors des fonctionnements à haute vitesse, ou à haute température, bien que son couple massique lui donne un avantage certain. Par conséquent, la machine asynchrone semble être la meilleure candidate pour répondre aux exigences principales de la traction électrique.

Les véhicules électriques et hybrides nécessitent un couple important aux basses vitesses pour assurer les fonctions de traction et de "start and go". Par conséquent, la zone de fonctionnement à couple constant est réduite, et conduit à une diminution très rapide du couple aux hautes vitesses. Pour accroître la plage de fonctionnement à couple constant, il est aujourd'hui possible d'employer la machine à réductance variable associée à de nouvelles techniques d'alimentation. Cette machine présente de nouveau de l'intérêt, car ses atouts deviennent alors comparables, voire supérieurs aux machines alternatives.

La machine à réductance variable à double saillance, à laquelle on s'intéresse dans ce travail, présente de nombreux avantages, à savoir : ni balai, ni collecteur, elle est de conception très simple. L'absence d'aimants et de bobinages au rotor lui confère une grande robustesse. Des progrès réalisés en électronique de puissance et la disponibilité de calculateurs numériques très performants ont considérablement servi à l'introduction de cette machine dans le monde industriel [1-8]. Toutefois, comme tout type de machine, la MRV présente quelques inconvénients qui limitent son utilisation de nos jours. Sa commande est complexe, puisque les caractéristiques de la machine sont fortement non-linéaires ; elles dépendent des

courants de phase et de la position du rotor. De plus, le couple produit est fortement ondulé et les bruits acoustiques et vibratoires sont assez importants.

Le mode d'opération classique de la MRV est la conduction discontinue : la phase est complètement démagnétisée à la fin de chaque période électrique et le courant de phase démarre de zéro à chaque nouvelle conduction. Avec la croissance de la vitesse, ce mode de fonctionnement est incapable de maintenir le couple à cause de la chute du courant de phase.

Une solution consiste à passer en mode de conduction continue où la phase conduit sans interruption. À chaque nouvelle magnétisation, le courant croît à partir d'une certaine valeur initiale non nulle, constante en régime permanent. Les recherches sur ce mode de fonctionnement sont assez récentes, bien que les avantages d'une "excitation" (une composante continue) soient connus depuis plus longtemps en terme d'amélioration significative du facteur de puissance [9–15]. La comparaison des performances du prototype considéré dans cette étude selon le mode d'alimentation (Fig. 1) montre clairement l'intérêt de ce nouveau mode de fonctionnement.

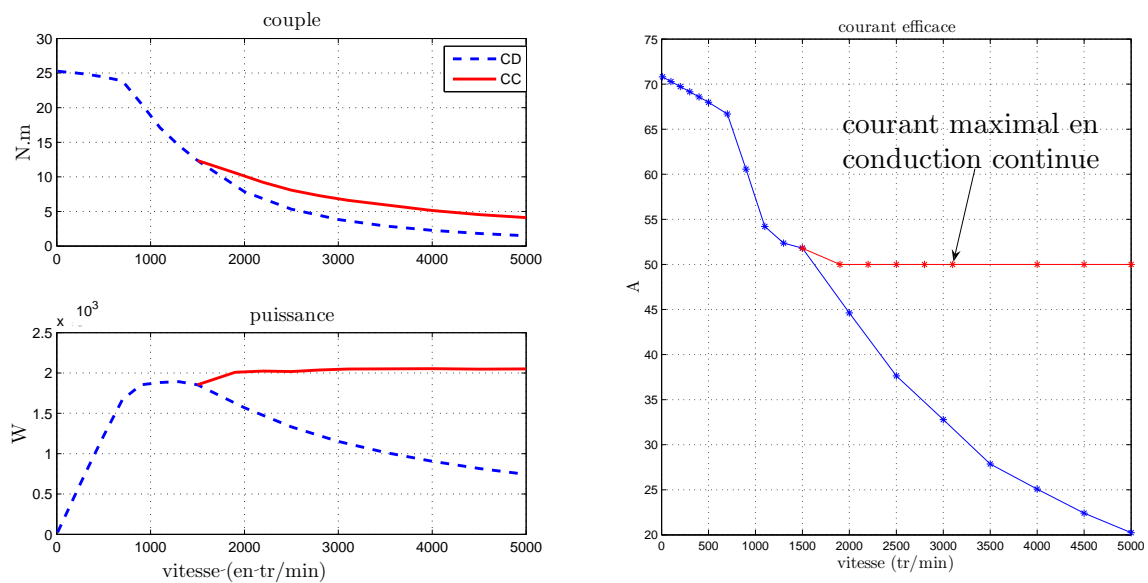


FIG. 1. (a) Courbes enveloppes du couple et de la puissance, et (b) courant efficace maximale en fonction de la vitesse mécanique, selon les deux modes de conduction : continue (CC) et discontinue (CD).

L'article est structuré en 3 sections : la stratégie de commande est décrite dans la section 2, les résultats de simulation et expérimentaux lors du fonctionnement en conduction continue sont abordés dans la section 3. Enfin, le dernier paragraphe traite des avantages et des inconvénients de cette technique de commande.

## II. Stratégie de commande

La conduction continue est réalisée en augmentant l'angle de conduction  $\theta_p$ <sup>1</sup> à des valeurs supérieures à  $180^\circ$  : le fait que l'angle  $\theta_p$  soit supérieur à une demi-période électrique ( $180^\circ$ ) peut entraîner une démagnétisation incomplète des phases et donc une croissance progressive du flux et du courant. Le risque dans ce mode de fonctionnement est de perdre le contrôle du courant et que ce dernier continue à croître jusqu'au déclenchement de la protection du système. Un contrôle performant du courant s'avère donc être nécessaire pour maîtriser les risques de divergence.

Pour contrôler la valeur du courant, une boucle de régulation sur le courant efficace est introduite. Cette boucle est présentée à la figure 2 : à la fin de chaque période électrique, le courant efficace  $I_{eff}$  est calculé et utilisé pour corriger l'angle de conduction  $\theta_p$ , de telle manière à asservir  $I_{eff}$  à sa consigne  $I_{eff}^*$ . Cette nouvelle valeur corrigée de  $\theta_p$  est donc appliquée au pas suivant. La valeur maximale admissible du

<sup>1</sup>durée de magnétisation de la phase

courant de référence  $I_{eff}^*$  est ici fixé à 50A lors du fonctionnement en conduction continue pour protéger l'onduleur lors du fonctionnement de la machine en conduction continue, comme représenté à la Fig. 1.

Le choix de l'angle d'amorçage  $\psi$ , de conduction  $\theta_p$ , ainsi que la consigne de courant efficace  $I_{eff}^*$  sont calculés hors-ligne [21], et enregistrés dans des tables. Le choix des triples  $(\psi, \theta_p, I_{eff}^*)$  dépend du couple total désiré (en valeur moyenne), ainsi que de la vitesse comme représentée à la figure 2. Ce triplet assure une minimisation des ondulations de couple lors du fonctionnement en conduction continue.

L'activation de la conduction continue est activée uniquement lorsque le couple désiré est supérieur au couple pouvant être délivré par la machine en conduction discontinue. La boucle de correction de l'angle de conduction est mise en œuvre par un régulateur PI standard dont les paramètres sont donnés dans le tableau I. Les gains du régulateur ont été adoptés afin d'assurer un fonctionnement progressif de la machine lors d'un changement de mode. Enfin, la correction de l'angle de conduction :

- compense les imprécisions du modèle de la machine et du convertisseur utilisé pour générer les tables,
- sert de système de protection, lors de variation de paramètres de la machine telle que la résistance, et pouvant entraîner un dysfonctionnement du système.

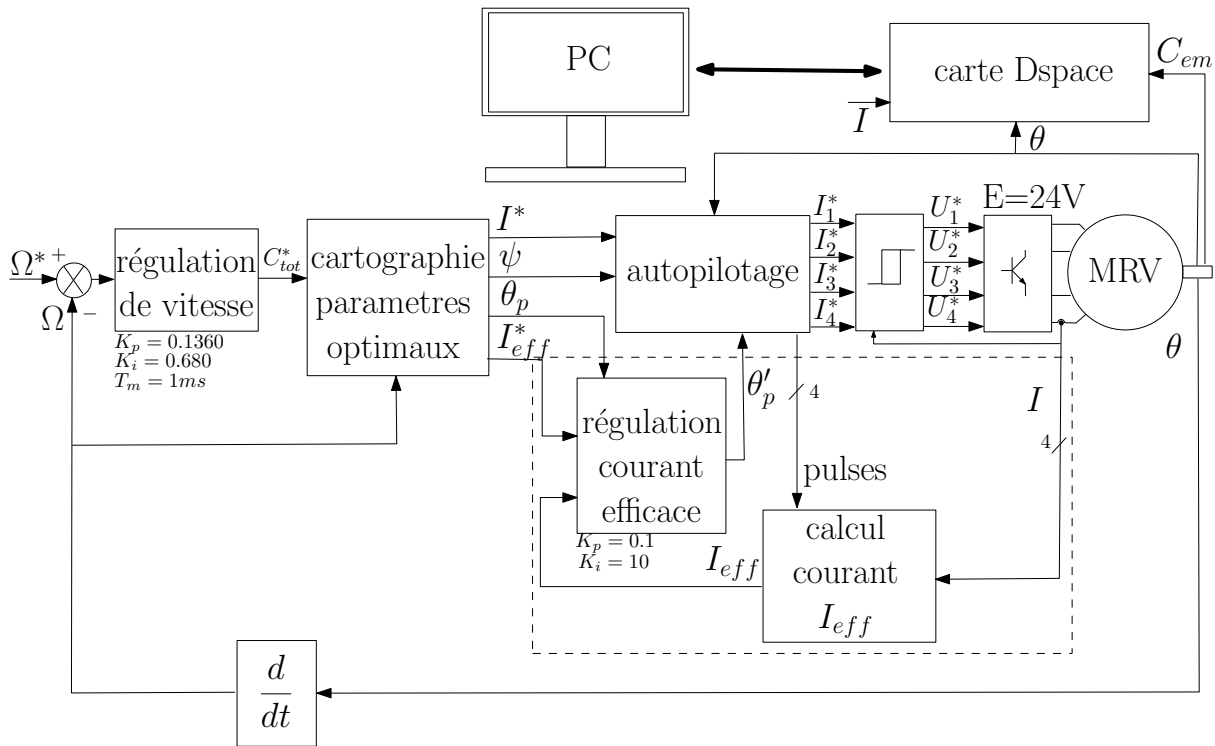


FIG. 2. Schéma bloc général de la commande.

### III. Résultats de simulation et expérimental

La stratégie de commande a été validée par simulation, puis expérimentalement sur le prototype du laboratoire. En pratique, un régulateur de vitesse est ajouté à la commande, afin d'éviter tout dysfonctionnement. La vitesse mécanique est contrôlée par un régulateur PI (les paramètres sont donnés dans le tableau I), dont la fréquence d'échantillonnage a été fixée à 1ms. L'asservissement de courant est assuré par un régulateur par hystérésis dont la fréquence d'échantillonnage est de 50μs.

Le test effectué consiste à faire varier le couple de charge, à une vitesse constante de 2500 tr/min, de façon à ce que le couple demandé dépasse le couple maximal pouvant être développé en conduction discontinue (voir figure 3.e). La machine est ainsi forcée à entrer en conduction continue afin de répondre à la demande en couple. La réponse de la vitesse ainsi que la surcharge appliquée à l'instant  $t \approx 0.3$ s sont montrées sur les figures 3.a et 3.e : le régulateur de vitesse réagit à la perturbation et ramène la vitesse à sa référence.

TABLE I  
PARAMÈTRES DE LA COMMANDE

Régulateur de vitesse ( $T_m = 1$ ms)			
$K_p$	0.1360	$K_i$	0.680
Régulateur de courant efficace (fréquence d'échantillonnage variable)			
$K_p$	0.1	$K_i$	10

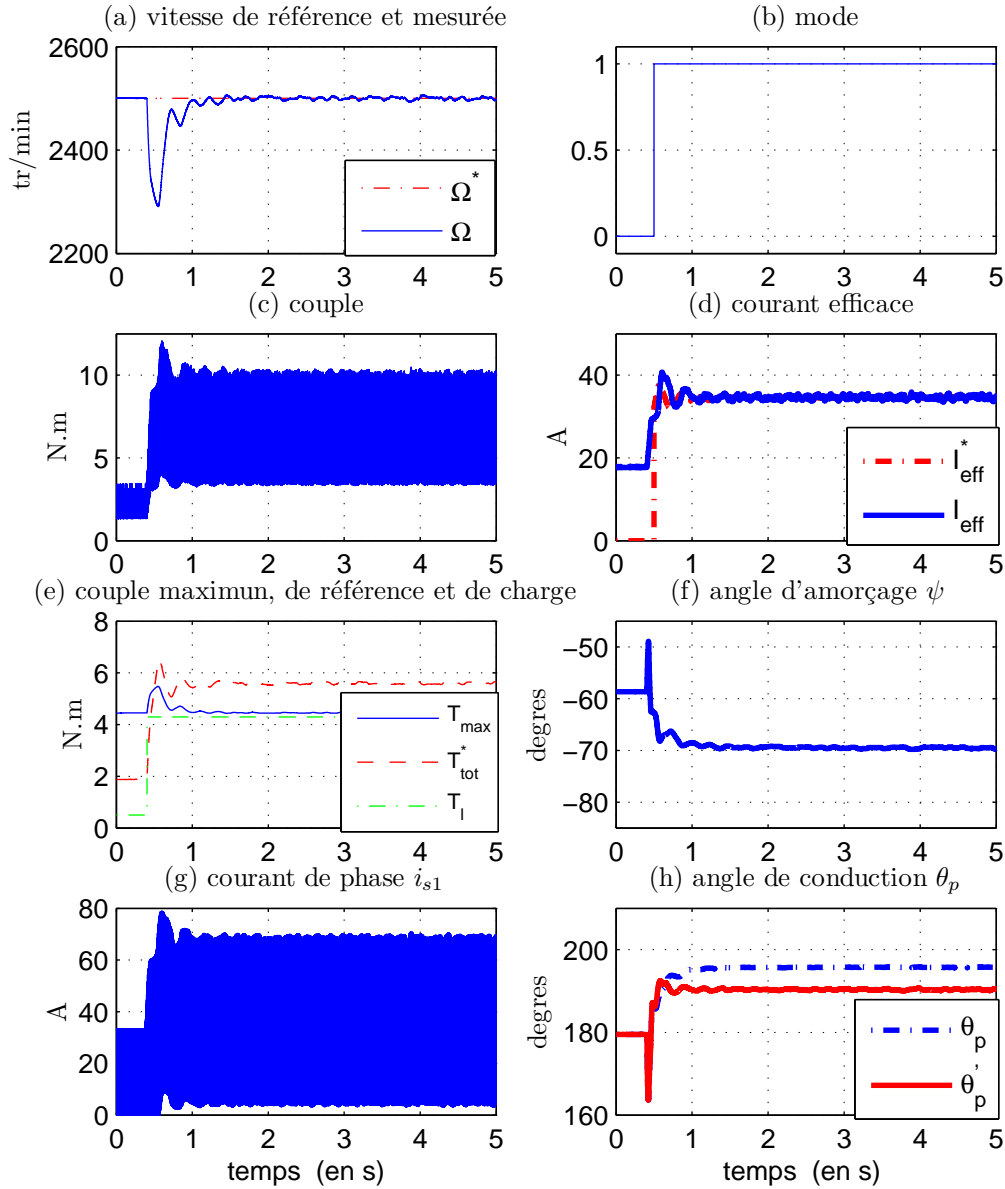


FIG. 3. Résultats de simulation en conduction continue.

La variable "mode" permet d'activer la boucle de régulation du courant efficace autour de 0.5s (voir figure 3.b). A cet instant, la régulation du courant efficace commence comme le montre la figure 3.d : le courant efficace, calculé à la fin de chaque période électrique à partir du courant de phase mesuré, passe d'abord par un régime transitoire avant d'atteindre le régime permanent. On observe des oscillations du courant dues principalement à la valeur importante de la période d'échantillonnage électrique  $T_e$  égale

à  $50\mu s$ . Ces oscillations de courant entraînent de plus importantes ondulations de couple et de vitesse, comme le montrent les figures 3.a et 3.c. Cependant, le système reste stable, et on peut considérer que le contrôle du courant efficace est assuré.

La figure 3.f trace la variation en ligne de l'angle d'amorçage  $\psi$  fourni par la cartographie. La mesure du courant de la première phase montrant l'entrée en conduction continue est illustrée sur la figure 3.g.

L'angle de conduction  $\theta'_p$  corrigé par la boucle de régulation du courant efficace, est montré dans la figure 3.h en comparaison avec celui obtenu par la cartographie  $\theta_p$ . En conduction discontinue, la régulation du courant efficace est désactivée et les deux angles sont égaux, tandis qu'une différence est observée dès que la machine entre en conduction continue. On constate alors que l'angle  $\theta'_p$  est inférieur à l'angle  $\theta_p$ . Ceci est justifié par la non prise en compte des pertes du convertisseur (pertes par conduction et commutation) et des pertes magnétiques dans le modèle de simulation Matlab/Simulink, bien que ces pertes soient prises en compte dans le logiciel MRVSIM [21] ayant permis l'obtention des tables.

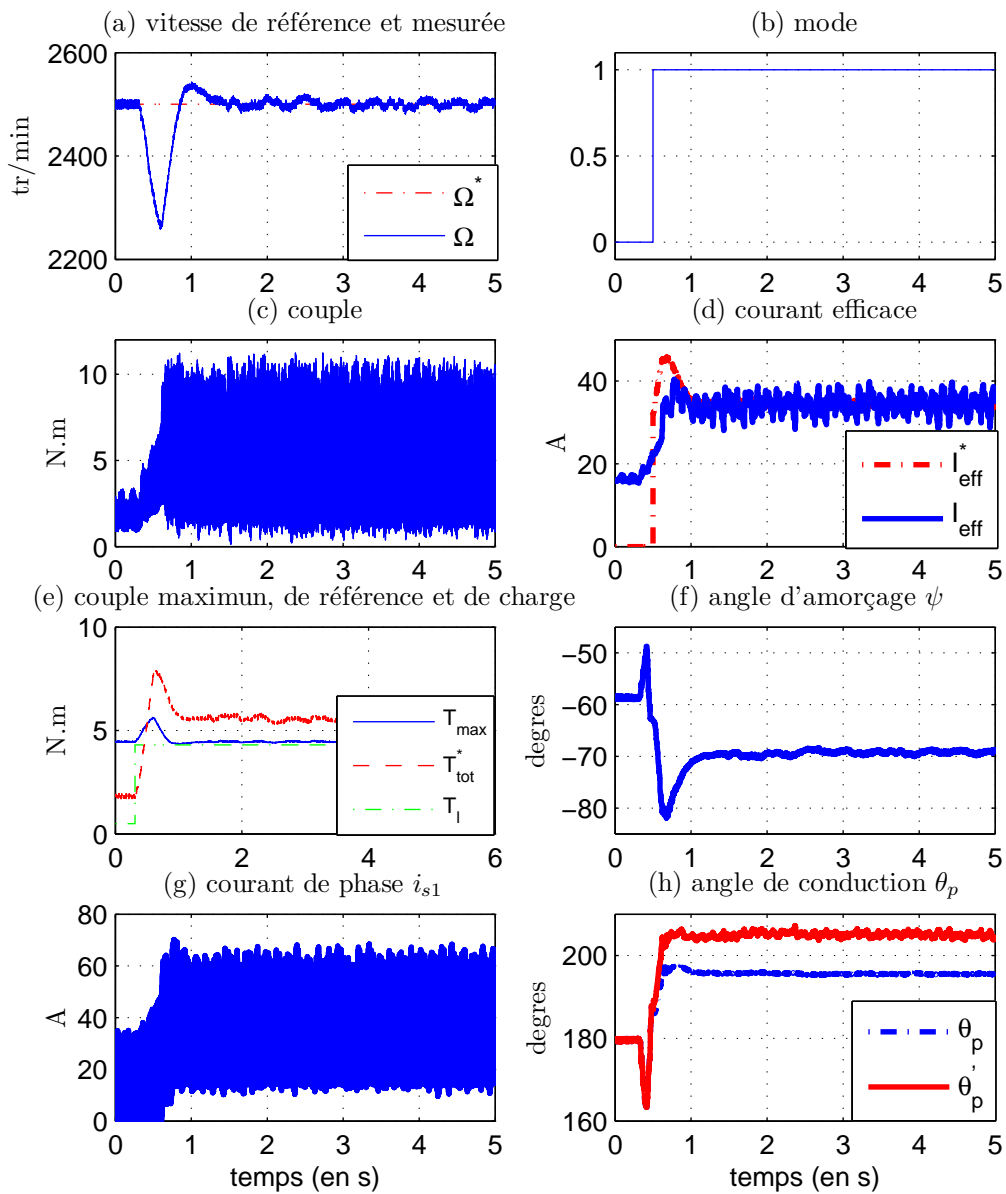


FIG. 4. Résultats de simulation en conduction continue.

La commande a été ensuite mise en œuvre sur un banc d'essai constitué, d'une carte de commande Dspace 1103, d'une MRV de 1.2 kW, d'un capteur de couple, d'un frein à poudre, ainsi que d'une machine à courant continu. Le test expérimental, dont les résultats sont présentés dans la figure 4 est identique au test de simulation. Bien que les mesures expérimentales soient un peu plus bruitées, les résultats restent assez semblables. Toutefois, deux points peuvent être discutés :

- La figure 4.f montre que l'angle d'amorçage passe approximativement vers  $-80^\circ$  à l'instant 0.7s. Ce point de fonctionnement est à corrélérer avec le second dépassement de la vitesse mécanique. En effet, plus la vitesse augmente, plus l'amorçage doit être anticipé.
- La figure 4.f montre que l'angle  $\theta'_p$  est inférieur à l'angle  $\theta_p$ . Ceci peut être justifié par l'augmentation de la résistance de phase dû à l'échauffement d'une part, et par une sous estimation des pertes onduleur d'autre part. Pour avoir un même courant efficace circulant dans les phases, l'angle de conduction se voit donc augmenter pour compenser cette chute de tension moyenne aux bornes de la phase.

#### IV. Discussion

L'implémentation d'une commande comportant le mode "conduction continue" conduit à une augmentation de la puissance et du couple en comparaison avec une commande classique, comme le montre la figure 1 : pour des vitesses supérieures à 3500 tr/min, le couple est multiplié par un facteur 2, voir supérieur. La nouvelle courbe enveloppe dépend du courant efficace admissible dans la machine ; dans notre cas, nous avons fixé la limite à 50A pour protéger la machine et le convertisseur.

Il est important de rappeler que la conduction continue permet d'accroître le couple dans le "zone de défluxage" avec une tension d'alimentation constante. Ce sur-couple est uniquement limité par le courant efficace admissible, et donc par les capacités thermiques de la machine.

Un autre avantage de la conduction continue provient du fait que le coût et la taille du convertisseur peuvent être réduits par une augmentation du nombre de tours, et par conséquent, réduire la puissance à convertir pour un couple maximal constant [14, 17]. Toutefois, cet avantage n'est que théorique et non applicable. En effet, le rendement global de la machine et du convertisseur décroît lors du fonctionnement en conduction continue dû essentiellement aux pertes joules, comme illustré à la figure 5. Ainsi, la conduction continue est un excellent moyen pour augmenter les pics de puissance, et non pour augmenter la puissance nominale de la machine.

Ce mode de fonctionnement permet, par exemple, une augmentation du couple de 3.8 N.m à 6.36 N.m pour une vitesse mécanique de 3000 tr/min. Toutefois, comme nous pouvions nous y attendre, les phases de la machine produisent des couples négatifs lors des phases génératives (voir figure 6.a). Bien que la somme des 4 couples produit par la machine est supérieure au couple que produirait la machine en fonctionnement discontinu, la conduction continue conduit à une augmentation des ondulations de couple et une diminution du rendement.

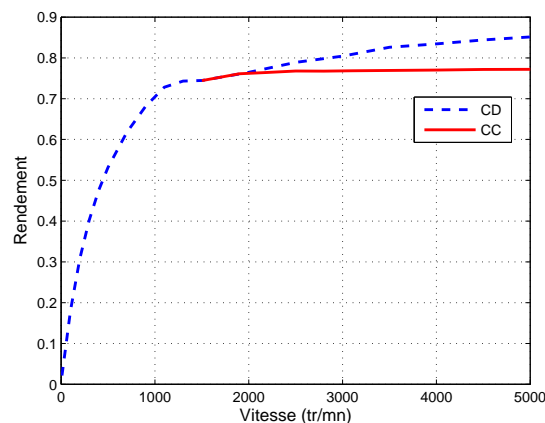


FIG. 5. Influence de la conduction continue sur le rendement global.

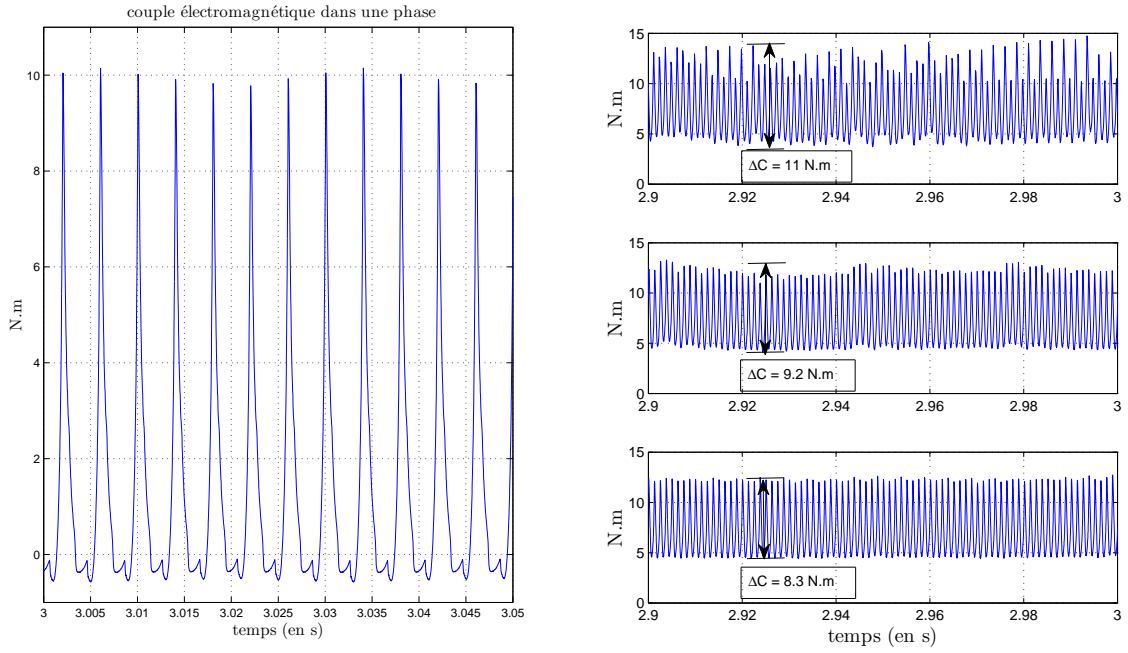


FIG. 6. (a) Représentation du couple électromagnétique de la phase 1, (b) Influence de la période d'échantillonnage sur les oscillations de couple.

TAB. II

INFLUENCE DE LA PÉRIODE D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LES OSCILLATIONS DE COUPLE.

	$T_e = 50\mu s$	$T_e = 10\mu s$	$T_e = 1\mu s$
maximum (N.m)	14.74	13.3	12.7
minimum (N.m)	3.7	4.1	4.4
$\Delta C$ (N.m)	11.04	9.2	8.3

Les résultats de simulation ont montré que la performance de la commande est très influencée par la période d'échantillonnage de l'autopilote de la machine, et par conséquent, de la réactualisation de la position mécanique. La figure 6.b montre le couple électromagnétique pour trois périodes d'échantillonnage différentes, à savoir : 1, 10 et  $50\mu s$ , tandis que le tableau II donne les valeurs numériques du couple maximal, minimal et l'amplitude des oscillations en fonction de la période d'échantillonnage. On constate que les ondulations de couple augmentent avec l'accroissement de la période d'échantillonnage de l'autopilote. Les résultats de simulation et expérimentaux ont montré que les performances sont convenables avec une période d'échantillonnage égale à  $50\mu s$ . Toutefois, ceci constitue probablement une limite à ne pas dépasser. Nous pouvons penser que les ondulations de couple peuvent être réduites, par l'implémentation de cette loi de commande sur un composant programmable, du type FPGA.

## V. Conclusion

Un nouveau régime excité fondé sur l'utilisation des seuls demi-ponts asymétriques appelé mode de conduction continue est décrit dans ce papier. La mise en œuvre de ce mode de commande est obtenue en utilisant une boucle de régulation du courant efficace afin d'éviter tout problème de perte de contrôle lié à la divergence du flux et/ou du courant.

La conduction continue permet d'étendre le fonctionnement de la MRV aux vitesses élevées permettant ainsi de maintenir une puissance constante. La proposition de l'ajout d'une boucle de courant efficace pour asservir l'angle de magnétisation a montré la faisabilité de cette commande tant en simulation qu'en expérimentation.

Pour conclure ce papier, la conduction continue peut être mise en œuvre pour des applications de tractions électriques ou hybrides, afin d'exploiter les pics de puissance que peuvent délivrer la machine.

### Références

- [1] A.V. Radun, "High-power density switched reluctance motor drive for aerospace applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28, N° 1, pp 113-119, 1992.
- [2] B.A. Kalan, H.C. Lovatt, G. Prout, "Voltage control of switched reluctance machines for hybrid electric vehicles," *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC'02)*, vol. 4, pp 1656-1660, 2002.
- [3] B. Fahimi, A. Emadi, R.B. Sepe, "A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars," *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 20, N° 1, pp 116-124, Mar. 2004.
- [4] J. Faiz, K. Moayed-Zadeh, "Design of switched reluctance machine for starter/generator of hybrid electric vehicle," *Electric Power Systems Research, Elsevier*, Vol. 75, N° 2-3, pp 153-160, 2005.
- [5] R.T. Naayagi, V. Kamaraj, "Shape optimization of switched reluctance machine for aerospace applications," *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON'05)*, Nov. 2005.
- [6] H.S. Lim, R. Krishnan, N.S. Lobo, "Design and control of a linear propulsion system for an elevator using linear switched reluctance motor drives," *IEEE Transactions on Industrial electronics*, Vol. 55, N°2, pp 534-542, Feb. 2008.
- [7] H.C. Chang, C.M. Liaw, "Development of a Compact Switched-Reluctance Motor Drive for EV Propulsion With Voltage Boosting and PFC Charging Capabilities," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, forthcoming, 2009.
- [8] P. Krishnamurthy, W. Lu, F. Khorrani, A. Keyhani, "Robust force control of an SRM-based electromechanical brake and experimental results," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, forthcoming, 2009
- [9] J.M. Stephenson, W.F. Ray, "Control of switched reluctance machines," *European patent, EP 0 534 761 A1*, 1993.
- [10] T. Humiston, P. Pillay, "Flux weakening operation of switched reluctance motor," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 3, pp 1372-1377, 2001.
- [11] R.B. Inderka, M. Menne, R.W.A.A. De Doncker, "Control of switched reluctance drives for electric vehicle applications," *IEEE Transactions on Industrial electronics*, Vol. 49, N°1, pp 48-53, Feb. 2002.
- [12] J.S. Lawler, J.M. Bailey, J.W. McKeever, P.J. Otaduy, "Impact of continuous conduction on the constant power speed range of the switched reluctance motor," *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives (IEMDC'05)*, pp 1285-1292, May. 2005.
- [13] R.B. Inderka, S. Kuppeler, "Extended Power by Boosting with Switched Reluctance Propulsion," *21th International Electric Vehicle Symposium, (EVS21)*, Monaco, Avr. 2005.
- [14] M. Reikik, M. Besbes, C. Marchand, B. Multon, S. Loudot, D. Lhotellier, "High-speed-range enhancement of switched reluctance motor with continuous mode for automotive applications," *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 18, pp 674-693, 2008.
- [15] N. Schofield, S. A. Long, D. Howe, M. McClelland, "Design of a switched reluctance machine for extended speed operation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 45, N° 1, pp 116-122, Jan-Fev 2009.
- [16] M. Krishnamurthy, C.S. Edrington, A. Emadi, P. Asadi, M. Ehsani, B. Fahimi, "Making the case for applications of switched reluctance motor technology in automotive products," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 21, Issue 3, pp 659-675, mar 2006.
- [17] M.D. Hennen, S.E. Bauer, R.W. De Doncker, "Influence of continuous conduction mode on converters in SRM drives," *22nd International Electric Vehicle Symposium, (EVS22)*, pp 1848-1857, Yokahoma, Japan, Oct. 2006.
- [18] I. Jordison et al, "Control of switched reluctance machines," *European patent, EP 1 385 263 A2*, 2005.
- [19] S. Loudot, "Method for controlling a heat engine vehicle driving assembly," *International patent, WO 2006/05028 A2*, 2006.
- [20] H. Hannoun, M. Hilaret, C. Marchand, "Speed control of a switched reluctance machine in continuous conduction mode," *IEEE International Conference on Electrical Machines ICEM08*, Vilamoura, Portugal, Sept 2008.
- [21] M. Besbes and B. Multon, "MRVSIM Logiciel de simulation et d'aide à la conception de Machines à réluctance variable à double saillance à alimentation électronique," *Deposit APP CNRS n.IDDN.FR.001.430010.000.S.C.2004.000.30645.*, 2004