



**HAL**  
open science

# Impact de la commande intermittente sur la pulsation du couple d'une machine à réluctance variable pour véhicule électrique

Duy-Minh Nguyen, Imen Bahri, Guillaume Krebs, Claude Marchand

## ► To cite this version:

Duy-Minh Nguyen, Imen Bahri, Guillaume Krebs, Claude Marchand. Impact de la commande intermittente sur la pulsation du couple d'une machine à réluctance variable pour véhicule électrique. 3ème Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981873

**HAL Id: hal-02981873**

**<https://hal.science/hal-02981873v1>**

Submitted on 28 Oct 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Impact de la commande intermittente sur la pulsation du couple d'une machine à réluctance variable pour véhicule électrique

Duy-Minh Nguyen, Imen Bahri, Guillaume Krebs, Claude Marchand

GeePs | Group of electrical engineering – Paris, UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Univ. Paris-Sud, Univ. Paris-Saclay  
Univ. Pierre et Marie Curie, Univ. Sorbonne

3 & 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon 91192 Gif-sur-Yvette CEDEX, France  
{ duy-minh.nguyen, imen.bahri, guillaume.krebs, claud.marchand }@geeps.centralesupelec.fr

**RESUME**—Objectif de la commande intermittente est d'augmenter le rendement du système comprenant la machine à réluctance variable (MRV) et son convertisseur statique dans les applications automobiles. Cependant, la MRV se caractérise par une ondulation importante du couple qui affecte le confort de la conduite. Ce papier étudie l'impact de la commande intermittente sur la pulsation du couple d'une MRV dans un véhicule électrique, puis propose des stratégies de glissement de cette commande pour réduire tel impact. Ceci est fait en analysant le couple électromagnétique de la MRV et l'accélération longitudinale du véhicule donné par son groupe motopropulseur.

**Mots-clés**—commande intermittente, glissement, groupe motopropulseur, machine à réluctance variable, ondulation du couple, rendement du système, véhicule électrique;

## 1. INTRODUCTION

Dans un véhicule électrique, le couple électromagnétique produit par le moteur électrique est transmis aux roues motrices à travers le groupe motopropulseur pour créer la propulsion. Ce système de transmission comprend des éléments tels que les différentiels, les arbres, les essieux, les engrenages, etc. Ces éléments présentent naturellement un certain niveau d'élasticité et jouent un rôle mécanique dans le système. Il en résulte que cette structure mécanique possède une ou plusieurs fréquences de résonance appelées modes propres. Ces modes propres peuvent être excités par le couple électromagnétique d'entrée, générant des à-coups mécaniques désagréables du véhicule. Avec un véhicule électrique motorisé par une machine à réluctance variable (MRV), cette problématique est à étudier car la MRV se caractérise par une ondulation importante du couple [1-5].

La commande intermittente d'une MRV a été breveté dans [6] and présentée dans [7] concernant l'efficacité énergétique. Cette commande peut augmenter le rendement du système pour la zone de moyen-faible couple. En effet, cette commande se caractérise par un couple discontinu, qui augmente l'ondulation du couple et tend à exciter considérablement les modes propres du groupe motopropulseur. Cependant, comme les phases activées peuvent être décalées, des stratégies de la commande intermittente sont proposées pour réduire cet impact en modifiant le contenu harmonique du couple de la MRV avec un glissement

des phases. Ces stratégies sont étudiées avec un modèle d'un groupe motopropulseur d'un véhicule électrique particulier.

## 2. COMMANDE INTERMITTENTE

Le système étudié comprend une MRV 8/6 à quatre phases, et son convertisseur statique. La MRV consiste de huit dents statoriques et six dents rotoriques. Les données du système sont normalisées pour la raison de confidentialité. Le principe de la commande intermittente est déduit de la cartographie de rendement du système dans Fig. 1. Sur cette figure, la courbe de rendement maximale (MEC) est également tracée. Cette courbe indique le point de fonctionnement le plus efficace de chaque vitesse. Cela signifie que le système atteint le meilleur rendement lorsqu'il fournit cette valeur de couple.

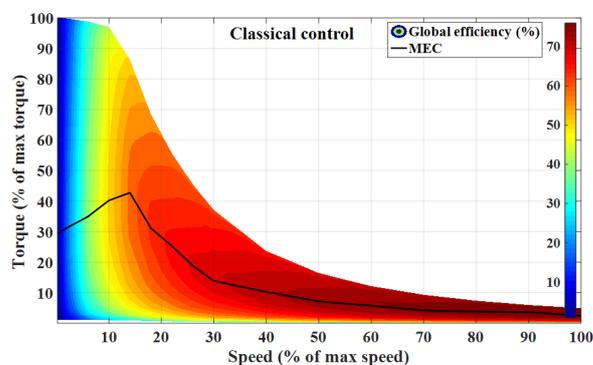


Fig. 2. Cartographie de rendement avec la MEC

Dans le but de maintenir le couple moyen de machine, l'idée de la commande intermittente est que, pour un point de fonctionnement au-dessous de la MEC, la commande intermittente impose un couple de référence de phase plus élevé, et éteint quelques phases en même temps. Par exemple, la MRV fonctionne à 700rpm, 6Nm. La commande classique impose un couple de référence de phase de 6Nm sur quatre phases. La commande intermittente impose un couple de référence de phase de 12Nm sur que deux phases. Le couple moyen de machine dans les deux cas reste à 6Nm. Dans ce principe, la commande intermittente ne peut être appliquée que dans la zone en dessous de la MEC, car pour un point au-dessus de la MEC, le couple de référence de phase doit être diminué afin d'atteindre un meilleur rendement mais le nombre de phase ne peut pas être augmenté pour maintenir le couple moyen de machine.

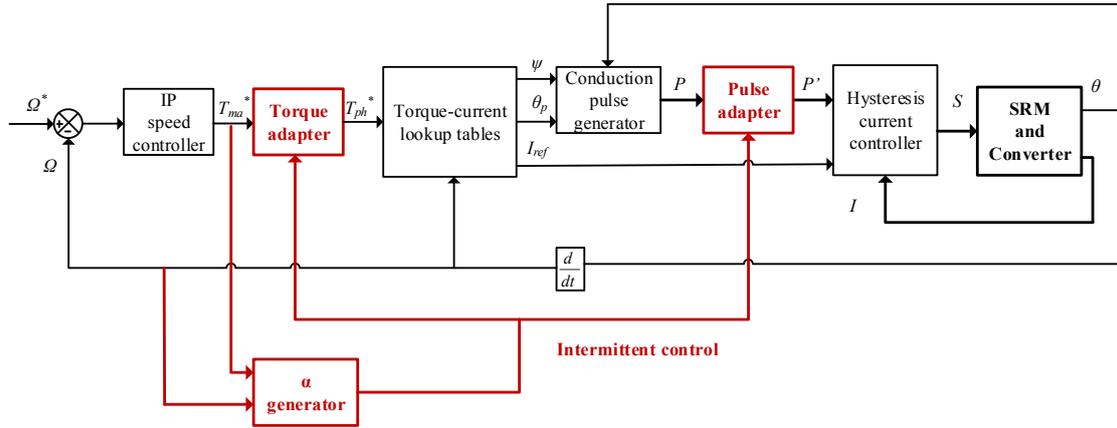


Fig. 2. Structure de la commande intermittente

### 2.1. Structure de la commande intermittente

Fig. 2 montre la structure de la commande intermittente [7] y compris la boucle de vitesse et la boucle de courant de la commande classique (blocs noirs) [8]. Dans la commande indirecte du couple moyen, le couple est réglé indirectement par la boucle de courant. Le passage du couple de référence au courant de référence, qui est non-linéaire, est fait par des cartographies. La boucle de courant utilise un régulateur de courant d'hystérésis. Le courant de référence est caractérisé par trois paramètres de commande appelées un triplet illustré dans Fig. 3: amplitude de courant  $I_{ref}$ , angle d'amorçage  $\psi$  et angle de conduction  $\theta_p$ .

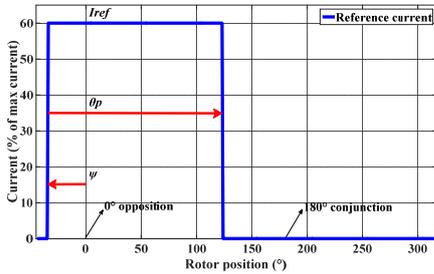


Fig. 3. Courant de référence

Les cartographies de passage couple-courant sont pré-générées depuis une sélection optimale [9] avec un code du laboratoire appelé MRVSIM [10]. En effet, il y a plusieurs triplets qui peuvent faire fonctionner la MRV à un même point de fonctionnement. En considération de l'efficacité énergétique, le seul triplet qui maximise le rendement du système est sélectionné pour la commande intermittente.

Pour réaliser la commande intermittente, trois blocs rajoutés dans la structure de la commande classique sont le générateur d'alpha, l'adaptateur de couple et l'adaptateur de pulse (blocs rouges, Fig. 2). La commande intermittente se caractérise par le rapport cycle «  $\alpha$  » qui est le ratio entre le nombre de phases activées  $k$  est le nombre total de phases  $q$  :

$$\alpha = \frac{k}{q}, \text{ avec } 1 \leq k \leq q. \quad (1)$$

**Le générateur d'alpha** est une cartographie générée par un algorithme de sélection. Comme défini en (1), il y a quatre valeurs d'alpha possibles qui peuvent être appliquées pour chaque point de fonctionnement. Par contre, seulement les valeurs d'alpha qui rendent la MRV fonctionne au-dessous du couple max sont autorisées. Puis, la seule valeur qui rend le système atteindre le meilleur rendement est sélectionnée. Fig. 4 montre la cartographie d'alpha obtenue par cette sélection. Les rapports cycliques 1/4, 2/4, 3/4, 4/4 sont respectivement appliqués en zones (a), (b), (c) et (d) du plan couple-vitesse. Avec  $\alpha=4/4$ , la commande intermittente fonctionne comme la commande classique car le système atteint déjà le meilleur rendement. Par contre, la commande intermittente ne peut pas être appliquée dans la zone au-dessus de la courbe MEC. Car dans cette zone, le couple de de phase doit être diminué pour atteindre un meilleur rendement alors que le nombre de phases est fixe, le couple de machine ne peut pas donc être assuré.

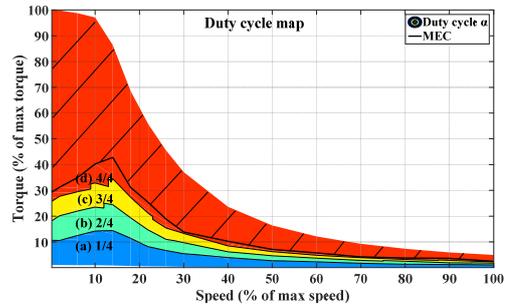


Fig. 4. Duty cycle map of the intermittent control

**L'adaptateur de couple** calcule le couple de référence de phase  $T_{ph}^*$  à partir du couple de référence de machine  $T_{ma}^*$ :

$$\alpha.T_{ph}^* = T_{ma}^*, \text{ donc } T_{ph}^* = \frac{1}{\alpha}.T_{ma}^*. \quad (2)$$

**L'adaptateur de pulse** décide quels phases à activer selon le rapport cyclique alpha. La pulse de conduction de la phase  $i$  de la commande intermittente  $p_i$  est calculé à partir de la pulse de conduction de la phase  $i$  de la commande classique  $p_i$  et le facteur de sélection  $f_i$  :

$$p_i' = p_i \cdot f_i, \text{ avec } f_i = \begin{cases} 1, & \text{Si phase } i \text{ ON} \\ 0, & \text{Si phase } i \text{ OFF} \end{cases} \quad (3)$$

Fig. 5 montre un exemple de la commande intermittente appliquée au point de fonctionnement : 14% vitesse max, 24% couple max. La commande classique (a) alimente quatre phases avec un couple de référence de 24% couple max. Le rendement atteint 57.62% (Fig. 1). La commande intermittente alimente deux phases avec un couple de référence de 28% couple max. Le rendement atteint 29.24% (Fig. 1). Le rendement est augmenté de 1.6 points de pourcentage pour la même charge.

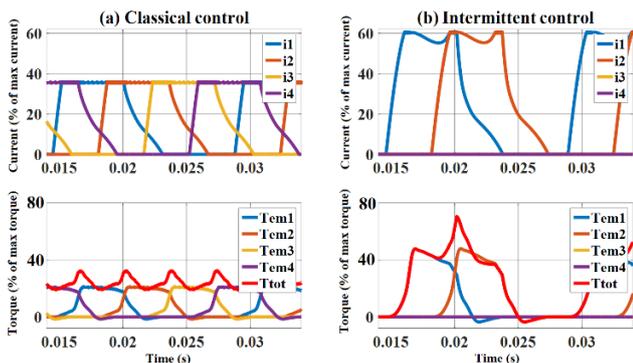


Fig. 5. Formes d'onde de courant et de couple à 14% vitesse max speed, 20% couple max par la commande classique (a), la commande intermittente (b)

## 2.2. Stratégies de la commande intermittente

En effet, les phases activées peuvent être librement choisies. Cette section présente des stratégies de la commande intermittente qui peuvent influencer la pulsation du couple de la MRV. Dans la stratégie initiale présentée en principe, les phases activées sont fixées durant toutes les périodes électriques. Il y a six périodes électriques ( $T_e$ ) pendant chaque période mécanique ( $T_m$ ). Les phases activées peuvent être changées régulièrement dans la direction croissante (glissement direct) ou dans la direction décroissante (glissement inverse).

Quand les phases activées sont changées régulièrement, la distance angulaire entre deux pics de couple change. Par conséquence, le nombre de pics de couple pendant une période mécanique change et le couple moyen n'est plus assuré. Le couple de référence soit compensé par un facteur secondaire appelé rapport glissant «  $\beta$  ». Le rapport glissant est défini par le ratio entre la distance de pic de la stratégie fixe  $D_{fixe}$  et celle de la stratégie glissante  $D_{glissante}$ .

$$\beta = \frac{D_{fixe}}{D_{glissante}} \quad (4)$$

L'équation (2) devient:

$$\alpha \cdot \beta \cdot T_{ph}^* = T_{ma}^*, \text{ donc } T_{ph}^* = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot T_{ma}^* \quad (5)$$

**Stratégie fixe:** les phases activées, notées  $p_i$ , sont fixes pour toutes les périodes électriques (Fig. 10b). La distance de pic est  $D_{fixe} = T_e$ . Il y a six pics de couple pendant chaque période mécanique. Les phases activées sont notées dans Tab. I.

TABLE I. STRATEGIE FIXE

$\alpha$	Phase(s) activée(s)	$\beta$
1/4	p1	1
2/4	p1, p2	
3/4	p1, p2, p3	

**Stratégie glissante directe:** les phases activées sont changées régulièrement dans la direction croissante (Fig. 10c). La distance de pic  $D_{glissante} = T_e(1+1/4)$  est plus longue que  $D_{fixe}$ . Il y a moins de pics de couple pendant chaque période mécanique. Les fréquences générées des courants et des couples sont plus faibles, comparées avec la stratégie fixe. Les phases activées sont notées dans Tab. II.

TABLE II. STRATEGIE GLISSANTE DIRECTE

$\alpha$	Phase(s) activée(s)				$\beta$
	1 <sup>ère</sup> période	2 <sup>ème</sup> période	3 <sup>ème</sup> période	4 <sup>ème</sup> période	
1/4	p1	p2	p3	p4	4/5
2/4	p1, p2	p2, p3	p3, p4	p4, p1	
3/4	p1, p2, p3	p2, p3, p4	p3, p4, p1	p4, p1, p2	

**Stratégie glissant inverse:** les phases activées sont changées régulièrement dans la direction décroissante (Fig. 10d). La distance de pics  $D_{glissante} = T_e(1-1/4)$  est plus courte que  $D_{fixe}$ . Il y a plus de pics de couple pendant chaque période mécanique. Les fréquences générées des courants et des couples sont plus hautes, comparées avec la stratégie fixe. Les phases activées sont notées dans Tab. III.

TABLE III. STRATEGIE GLISSANTE INVERSE

$\alpha$	Phase(s) activée(s)				$\beta$
	1 <sup>ère</sup> période	2 <sup>ème</sup> période	3 <sup>ème</sup> période	4 <sup>ème</sup> période	
1/4	p1	p4	p3	p2	4/3
2/4	p1, p2	p4, p1	p3, p4	p2, p3	
3/4	p1, p2, p3	p4, p1, p2	p3, p4, p1	p2, p3, p4	

Fig. 6 montre un exemple des stratégies avec une phase activée ( $\alpha=1/4$ ). Les couples de phase sont déjà compensés.

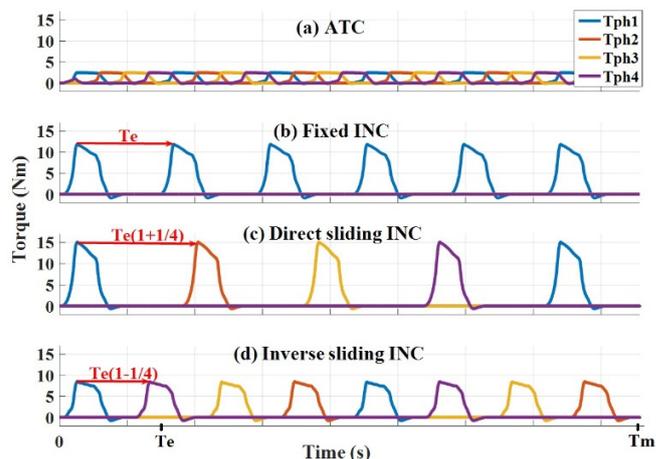


Fig. 6. Formes d'onde de la commande classique (a) et des stratégies de la commande intermittente (b), (c), (d) durant une période mécanique  $T_m$

## 3. EVALUATION DE LA COMMANDE INTERMITTENTE SUR LE CRITERE DE PULSATION DU COUPLE

Cette section présente un modèle d'un groupe motopropulseur particulier afin d'étudier l'impact de la commande intermittente sur l'accélération longitudinale du véhicule en comparaison avec la commande classique.

### 3.1. Modèle du groupe motopropulseur

Le groupe moto propulseur est un système de traction dans lequel seulement deux roues devant sont motorisées par la MRV [11]. Fig. 7 montre la composition du système avec des éléments : le rotor de la MRV, les arbres, les différentiels et les roues. Chaque élément du système est considéré comme un système amortisseur-ressort-masse qui se caractérise par trois composants : l'inertie équivalente  $J$ , le coefficient de rigidité  $k$  et le coefficient de viscosité  $f$ .

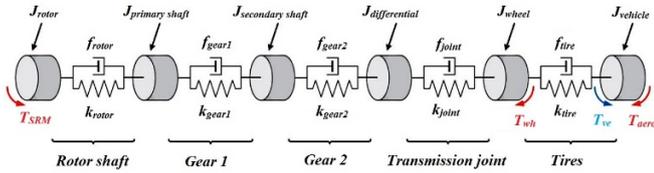


Fig. 7. Structure du groupe motopropulseur

Fig. 7 montre la représentation équivalente du groupe motopropulseur en tenant compte des hypothèses : les deux demi-arbres sont considérés identiques ce qui permet de les représenter par un essieu équivalent. L'inertie  $J_{wheel}$  représente l'inertie équivalente des demi-arbres, des roues et des pneumatiques ensemble. L'inertie  $J_{vehicle}$  représente l'inertie équivalente du véhicule incluant des passagers. Toutes inerties sont ramenées à l'arbre de rotor.

$T_{SRM}$  est le couple électromagnétique délivré par la MRV.  $T_{wheel}$  est le couple de résistance aux roues.  $T_{aero}$  est le couple de résistance aérodynamique au véhicule.  $T_{vehicle}$  est le couple du véhicule. L'accélération longitudinale du véhicule  $a_{vehicle}$  est calculée avec le rayon de roue  $R_{tire}$ , le rapport de vitesse  $n_{gear}$ .

$$a_{vehicle} = \frac{T_{vehicle}}{J_{vehicle}} \cdot \frac{R_{tire}}{n_{gear}} \quad (4)$$

Des variations de couple de référence données par la pédale génèrent un couple de la MRV avec un contenu harmonique très riche. Ces variations se passent au démarrage, au freinage, à l'accélération et à la décélération du véhicule. La conséquence est une excitation des modes propres du groupe motopropulseur. Fig. 8 montre le diagramme de Bode de la fonction de transfert entre le couple de la MRV et l'accélération longitudinale du véhicule. Le système consiste des modes propres  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$ . La fonction de transfert se comporte comme a gain aux fréquences faibles et présente une pente de -40dB par décade à partir de 10Hz, qui est similaire au comportement de double intégrateur.

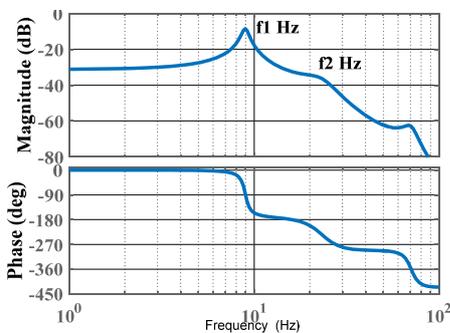


Fig. 8. Diagramme de Bode de la fonction de transfert entre le couple de la MRV et l'accélération longitudinale du véhicule

### 3.2. Performance de la commande

Dans le test, un couple de référence de 20% couple max est appliqué. La vitesse angulaire initiale du rotor est 10% de vitesse max. Le véhicule se passe une phase d'accélération de 3s. Les pertes cumulées des commandes sont vérifiées dans Fig. 9 en comparaison avec la commande classique (bleu). Les stratégies fixe (rouge) et glissante directe (vert) augmentent les pertes cumulées pendant la phase d'accélération à cause de l'excitation des modes propres. Par contre, la stratégie glissante inverse (violet) réduit toujours la perte cumulée.

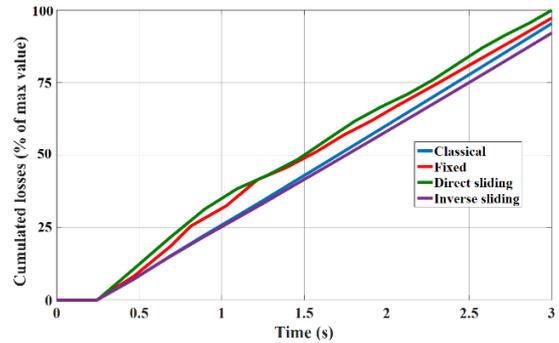


Fig. 9. Evolution des pertes totales cumulées des commandes

Fig. 10 montre les contenus harmoniques des couple de la MRV donnés par la commande classique (a), la commande intermittente fixe (b), glissante directe (c) et glissante inverse (d). Les accélérations longitudinales et les vitesses angulaires de roue sont présentées dans Fig. 11 et Fig. 12 respectivement.

Le couple délivré par la commande classique dans Fig. 10a est pris comme référence. Ce couple est l'entrée du groupe motopropulseur. L'accélération longitudinale et la vitesse angulaire résultantes sont montrées dans Fig. 11a et Fig. 12a. L'oscillation de l'accélération, qui est l'image des à-coups mécaniques, a une amplitude de  $1\text{m/s}^2$  et dure en 1s. Les à-coups mécaniques donnés par la commande intermittente sont déjà étudiés dans les littératures [1-5]. L'objectif des stratégies de la commande intermittente est de ramener l'accélération à la forme originelle donnée par la commande classique.

La stratégie fixe de la commande intermittente délivre un couple avec un contenu harmonique plus riche illustré dans Fig. 10b. La raison est que le couple est discontinu à une amplitude plus élevée. Etant l'entrée du groupe motopropulseur, ce couple excite sérieusement les modes propres de la chaîne cinématique et donne une accélération très oscillée avec une amplitude maxi de  $5\text{Nm}$  à la fréquence de résonance et dure en 2s dans Fig. 11b. La vitesse de roue est donc également oscillée. Cette oscillation est inacceptable pour un véhicule.

La stratégie glissante directe change régulièrement les phases activées dans la direction croissante. Le couple délivré par cette stratégie possède une amplitude plus importante que la stratégie fixe à cause du rapport glissant  $\beta=4/5$  vu dans Fig. 10c. Par contre, les phases glissantes changent évidemment le contenu harmonique du couple. Par conséquence, accélération et vitesse sont améliorées et obtenues dans Fig. 11c et Fig.12c. Mais ce résultat est encore loin de la commande classique.

La stratégie glissante inverse change régulièrement les phases activées dans la direction décroissante. Le couple délivré par cette stratégie possède une amplitude moins importante que la

stratégie fixe à cause du rapport glissant  $\beta=4/3$  vu dans Fig. 10d. Dans ce cas, l'accélération et vitesse sont ramenées à celles de la commande classique dans Fig. 11d et Fig. 12d. La différence est que l'accélération et la vitesse contiennent des fréquences harmoniques plus élevées.

#### 4. CONCLUSION

Ce papier étudie l'impact de la pulsation de couple des stratégies de la commande intermittente sur l'accélération longitudinale du véhicule en comparaison avec la commande classique. La commande intermittente donne un couple discontinu et riche en harmonique, ce qui crée des à-coups mécaniques non désirés. Par contre, la stratégie glissante inverse assure une accélération filtrable en augmentant le rendement.

#### REFERENCES

- [1] H. J. Brauer, M. D. Hennen and R. W. De Doncker, "Control for Polyphase Switched Reluctance Machines to Minimize Torque Ripple and Decrease Ohmic Machine Losses," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 370-378, Jan. 2012.
- [2] R. Mikail, I. Husain, Y. Sozer, M. S. Islam and T. Sebastian, "Torque-Ripple Minimization of Switched Reluctance Machines Through Current Profiling," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1258-1267, May-June 2013.
- [3] F. Profumo, M. Madlena and G. Griva, "State variables controller design for vibrations suppression in electric vehicles," *PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Baveno, 1996, pp. 1940-1947 vol.2.
- [4] N. Amann, J. Bocker and F. Prenner, "Active damping of drive train oscillations for an electrically driven vehicle," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 4, pp. 697-700, Dec. 2004.
- [5] G. Gotting and R. W. De Doncker, "Active drive control of electric vehicles using a modal state observer," *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, 2004, pp. 4585-4590 Vol.6.
- [6] D. Gilbertas, T. Basbous, "Système et procédé de commande d'une machine électrique équipant un véhicule électrique", Patent: WO2013153304 A1 and EP2836390 A1.
- [7] D. M. Nguyen, I. Bahri, G. Krebs and C. Marchand, "Intermittent control for efficiency gain of a switched reluctance machine," *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami, FL, 2017, pp. 1-7.
- [8] H. Hannoun, M. Hilairret and C. Marchand, "Design of an SRM Speed Control Strategy for a Wide Range of Operating Speeds," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 9, pp. 2911-2921, Sept. 2010.
- [9] M. Rekek, M. Besbes, C. Marchand, B. Multon, S. Loudot, D. Lhotellier, "Optimisation du nombre de spires et des angles de commande d'un moteur à réluctance variable à double saillance pour application de traction électrique", *Electrotechnique du Futur*, Grenoble, 2005.
- [10] M. Besbes, B. Multon, "MRVSim code: Logiciel de simulation pour l'aide au dimensionnement des MRVDS et des convertisseurs", Patent, N: IDN. FR. 001. 430010. 000. S. C. 2004. 000. 30645, 2004.
- [11] M. W. Arab "étude et conception d'un groupe motopropulseur électrique à faible niveau vibratoire et sonore pour véhicule électrique. Aspects « contrôle – commande »", PhD Thesis, Université Paris-Sud, école doctorale STITS, Laboratory GeePs, 2015.

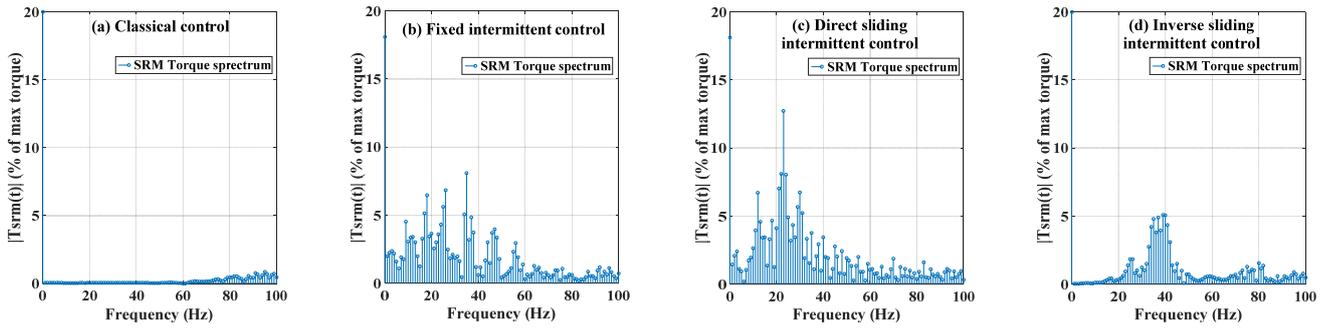


Fig. 10. Spectre du couple de la MRV donné par la commande classique et les stratégies de la commande intermittente

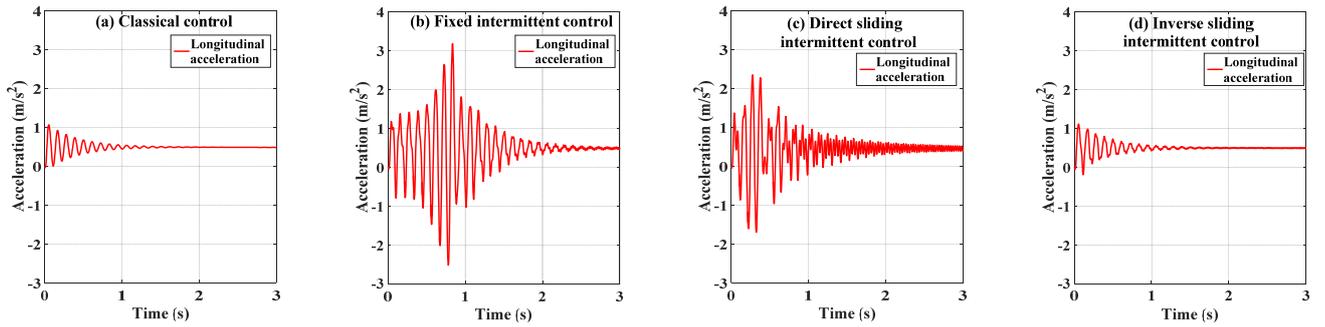


Fig. 11. Accélération longitudinale du véhicule donné par la commande classique et les stratégies de la commande intermittente

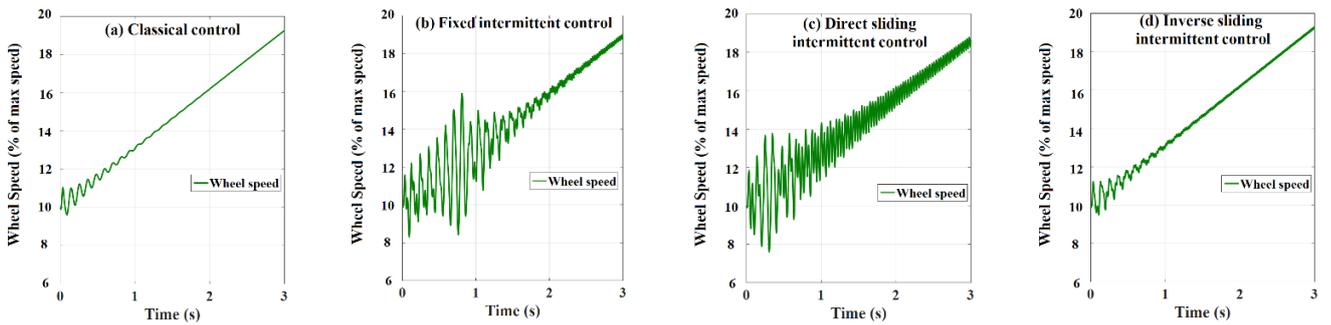


Fig. 12. Vitesse angulaire de roue donnée par la commande classique et les stratégies de la commande intermittente