

Commande de la machine synchrone à aimant permanent utilisant un seul capteur de courant avec une SVPWM aléatoire

Mokrane BALA¹, Adrien MERCIER¹, Imen BAHRI¹, Mohamed KHANCHOU², Guillaume KREBS¹,

¹ : Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette, France

Sorbonne université, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 75252, France

² : Valeo thermique Habitable, 78321 La Verrière

RESUME – Cet article présente une commande de la machine synchrone à aimants permanents avec un seul capteur de courant. Un algorithme de reconstruction des courants de phase est mis en place afin de pouvoir asservir la machine. Cet algorithme requiert une modification de la SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) pour assurer le bon contrôle de vitesse. Un étalement spectral via une SVPWM modifiée à des fréquences de découpage aléatoires est appliqué afin d'atténuer les bruits acoustiques et respecter les normes de la compatibilité électromagnétique CEM. L'originalité de ce papier réside dans l'application de la commande avec un seul capteur de courant et la SVPWM modifiée et aléatoire en même temps.

Mots-clés—Machine synchrone à aimants permanents, commande vectorielle, commande sans capteur, SVPWM modifiée, étalement spectral.

1. INTRODUCTION

Les entraînements à vitesse variable utilisant les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont de plus en plus répandues dans l'industrie. Ces machines sont utilisées dans une large variété d'applications, notamment pour des applications automobiles. Ce sont des machines fiables avec un bon rendement, présentant un couple massique élevé et une maintenance périodique réduite [1]. Afin de mieux profiter de ces avantages, plusieurs techniques de commande ont été développées pour asservir la vitesse de ces machines. Le cadre de l'étude présentée est celui d'une MSAP pour un compresseur de climatisation de véhicule électrique.

La commande la plus répandue de ce type de machine est la commande vectorielle car elle présente une bonne robustesse et une facilité de pilotage. Cette commande nécessite l'information sur la position du rotor et sur les valeurs instantanées des courants de phase [2]. Néanmoins, pour les produits de grandes séries, il est toujours intéressant de réduire les coûts et le volume de production. L'idée est ici de s'affranchir de capteurs sans dégrader les modes de fonctionnement. Dans cette optique, des travaux antérieurs ont proposé de remplacer les capteurs de courant des trois phases par un seul capteur situé au niveau du bus DC, en amont de l'onduleur [3]. Pour combler le manque d'information sur les courants de phase, il est nécessaire de recourir à un algorithme de reconstruction des courants. Par ailleurs les tensions de référence générées par la commande vectorielle sont appliquées à la machine synchrone via des convertisseurs de puissance. Ces derniers sont pilotés par des stratégies de commande comme la modulation de largeur d'impulsion MLI. Dans cette étude la MLI utilisée est la MLI à vecteur spatial (Space Vector Pulse Width Modulation ou

SVPWM), cette technique permet de générer les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur à une fréquence fixe dite fréquence de découpage. Cette fréquence de découpage engendre des harmoniques de courant et de tension, qui génèrent des effets indésirables tels que vibrations mécaniques, ondulations du couple, etc. De plus, ces fréquences de découpage sont souvent dans le domaine audible, qui peut être à l'origine d'une gêne acoustique pour les utilisateurs. Pour remédier à cela, des techniques dites d'étalement spectral permettent de réduire l'amplitude des harmoniques par une modification continue de la fréquence de découpage [4]. Cette technique d'étalement spectral est aussi largement utilisée pour respecter les normes de la compatibilité électromagnétique CEM.

Dans cet article, nous mettons en œuvre les deux techniques mentionnées dans le paragraphe précédent, c'est-à-dire utiliser un seul capteur de courant et une fréquence de découpage aléatoire pour piloter le moteur d'un compresseur de climatisation. La section 2 est consacrée à la reconstruction des courants de phase pour pouvoir asservir la vitesse du moteur. La section 3 présente l'étalement spectral appliqué à la commande avec un seul capteur de courant. Dans l'article final, une section supplémentaire sera consacrée à une discussion générale aux techniques employées.

2. RECONSTRUCTION DES COURANTS DE PHASE

Dans cette partie, la stratégie de commande de la machine synchrone à aimants permanents avec un seul capteur de courant est présentée. Dans notre application, les capteurs de courants de phase ont été supprimés et remplacés par un seul capteur situé au niveau du bus DC comme le montre la figure 1.

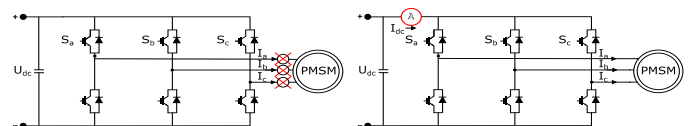


Fig. 1. Un seul capteur de courant

Pour asservir la vitesse de la machine, la connaissance des valeurs instantanées des courants de phase est nécessaire. Ils sont modifiés, via la transformée de Park, en un système diphasé afin de les comparer à leurs consignes pour générer par la suite les tensions à appliquer en sortie de l'onduleur. Cependant, la suppression des capteurs de courants de phase engendre la perte de l'information sur ces courants. Il faut donc mettre en place une stratégie afin de retrouver ces derniers.

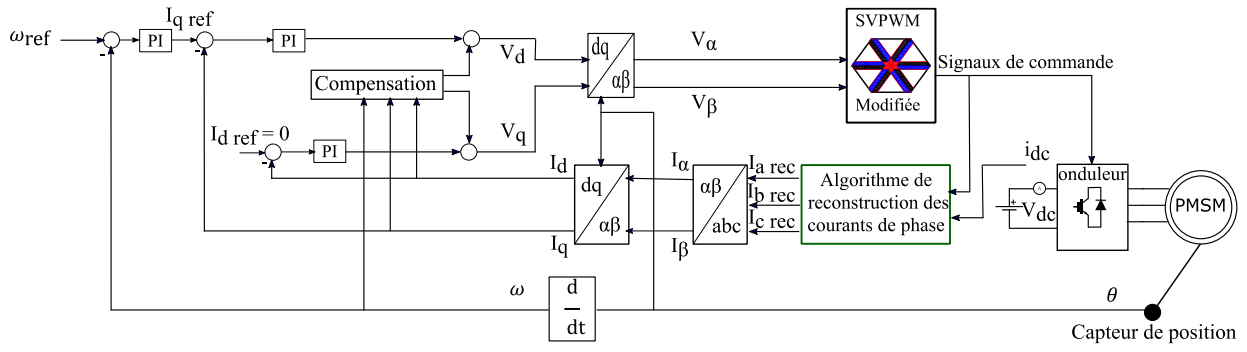


Fig. 2. Schéma bloc de régulation avec un seul capteur de courant

Cette stratégie est basée sur la seule mesure du capteur du courant du bus DC. En connaissant l'état des interrupteurs de l'onduleur, on peut attribuer la mesure du courant du bus DC à un courant de phase. L'équation suivante résume la relation entre les courants de phase et le courant du bus DC ainsi que les signaux de commande des interrupteurs :

$$i_{dc} = i_a \cdot S_a + i_b \cdot S_b + i_c \cdot S_c \quad (1)$$

Avec i_i : le courant de la phase i

S_i : l'état des interrupteurs de la $i^{\text{ème}}$ cellule de commutation

La SVPWM génère les signaux de commande des interrupteurs sous forme de vecteurs dits vecteurs de tension. Un vecteur de tension représente l'état des trois interrupteurs du haut de l'onduleur (S_a, S_b, S_c). Il existe huit vecteurs de tension, dont six sont actifs ($i_{dc} \neq 0$) et deux sont nuls ($i_{dc} = 0$). Pendant une période d'échantillonnage T_e , la SVPWM envoie quatre vecteurs de tension : deux actifs et deux nuls. Sachant que la mesure du courant I_{dc} est effectuée durant l'application d'un vecteur actif, deux courants de phase sont reconstruits durant une période d'échantillonnage. Le troisième courant de phase est calculé à partir des deux courants mesurés, sous la condition que la variation des courants est faible pendant T_e .

En pratique, la mesure du courant i_{dc} nécessite un certain temps T_{min} afin qu'elle soit réalisée; mais T_{min} n'est pas toujours respecté. En effet chaque vecteur de tension actif a une durée d'application T_{app} , cette durée est variable en fonction de la valeur du courant appliqué. Par conséquent, lorsque $T_{app} < T_{min}$ la mesure est faussée, ce qui se traduit par des erreurs sur les courants de phase reconstruits. Afin de corriger ces erreurs, une modification de la SVPWM est nécessaire, et sera détaillée dans la version finale du papier.

3. ÉTALEMENT SPECTRAL

Cette section est consacrée à l'étalement spectral en utilisant une modulation de largeur d'impulsion aléatoire. Il existe, généralement, trois configurations de base de la modulation aléatoire : dissymétrie aléatoire de la porteuse, fréquence de commutation aléatoire, position aléatoire du rapport cyclique. Dans cet article, on s'intéresse à la modulation de largeur d'impulsion avec fréquence de commutation aléatoire. Il s'agit d'une porteuse triangulaire symétrique mais avec une période de découpage T_d aléatoire comprise entre deux valeurs T_{dmin} et T_{dmax} , ces périodes correspondent aux fréquences de découpage f_{dmin} et f_{dmax} . Ceci nécessite absolument une synchronisation entre la porteuse et les modulantes générés par la SVPWM modifiée afin de garantir la durée d'application minimale des vecteurs actifs T_{min} requise pour l'acquisition du courant. Les détails seront présentés dans la version finale.

Les figures 3 et 4 représentent les résultats de simulation d'une comparaison entre la SVPWM classique et aléatoire. La

fréquence du fondamental est de 416 Hz et celle de découpage est de 10kHz. L'utilisation de la SVPWM aléatoire montre un bon étalement spectral autour de 10 kHz ainsi qu'une réduction de la densité spectrale de puissance de la tension de sortie. Des résultats complémentaires seront présentés dans l'article final.

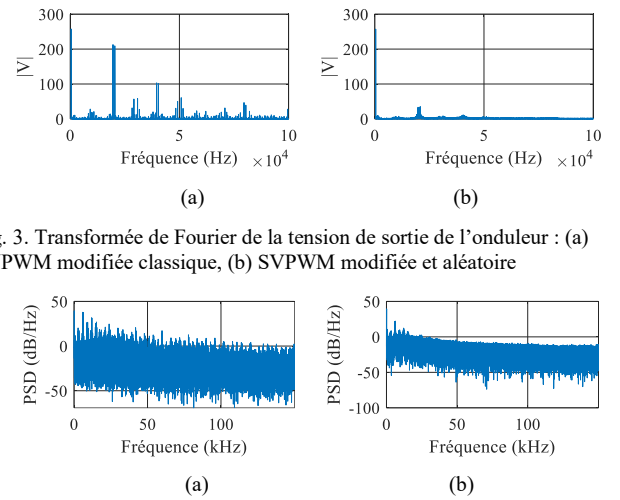


Fig. 3. Transformée de Fourier de la tension de sortie de l'onduleur : (a) SVPWM modifiée classique, (b) SVPWM modifiée et aléatoire

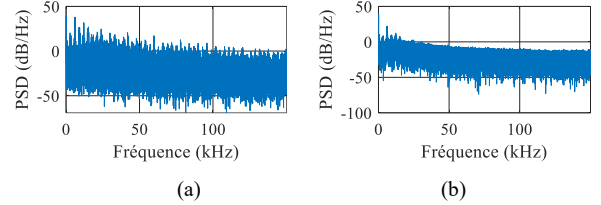


Fig. 4. Densité spectrale de puissance de la tension de sortie : (a) SVPWM modifiée classique, (b) SVPWM modifiée et aléatoire

4. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons présenté une commande de la machine synchrone à aimants permanents utilisant un seul capteur de courant avec une fréquence de découpage aléatoire. Cette loi de commande permet de réduire le nombre de capteurs, ce qui constitue un avantage économique pour la production de grande série. Par ailleurs, l'atténuation des harmoniques de courant et de tension facilite le respect des normes CEM et de bruit acoustique. Le cas d'étude présenté est celui d'un moteur de compresseur de climatisation mais cette stratégie pourrait être adaptée pour d'autres applications.

5. REFERENCES

- [1] M. Khanchoul, "Contribution au développement de la partie électromécanique d'un compresseur de climatisation de véhicule électrique", thèse de doctorat, Ecole doctorale STITS, 2013.
- [2] F. Niu, B. Wang, A. S. Babel, K. Li, and E. G. Strangas, "Comparative evaluation of direct torque control strategies for permanent magnet synchronous machines", IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 2, pp. 1408–1424, Feb 2016.
- [3] Y. Gu, F. Ni, D. yang, and H. Liu, "A Novel Phase Current Reconstruction Method Using a Single DC-Link Current Sensor", no. 2006, pp. 4878–4879, 2009.
- [4] Trzynadlowski A.M., Zigliotto M., Bolognani S., Bech M.M., "Reduction of the Electromagnetic Interference Conducted to mains in Inverter-fed AC Drives Using Random Pulse Width Modulation". IEEE Proceedings of Industry Applications Conference, 1998. 33rd IAS, Annual Meeting, Vol. 1, Oct. 1998, pp.739 – 744.