

Proposition pour accroître la puissance convertible par un ensemble onduleur de tension – machine synchrone à commutation de flux à double excitation dans une application motorisation de véhicule hybride ou électrique

Emmanuel HOANG, Benjamin GAUSSENS, Michel LECRIVAIN, Mohamed GABSI

SATIE-ENS Cachan

RESUME – Les machines synchrones associées à leur onduleur de tension sont généralement pilotées en courant. Dans cet article, nous nous intéressons à la commande en pleine onde de tension. La première partie décrit les performances attendues avec ce mode de commande. Dans la seconde, nous présenterons une machine synchrone à commutation de flux à double excitation (mscfde), dont les caractéristiques en font une candidate potentielle pour la motorisation électrique des véhicules hybrides ou électriques. Dans la troisième partie, sont présentés les résultats expérimentaux de cette mscfde comportant des aimants ferrite ($B_r = 0.4T$), alimentée en pleine onde de tension, pour convertir le maximum de puissance. Dans la dernière partie, nous présentons une solution, originale, pour accroître cette puissance maximale convertible.

MOTS-CLES – machine synchrone à commutation de flux à double excitation, commande en tension, conversion maximale de puissance.

1. Introduction

Avec le développement des applications à vitesse variable, les machines électriques doivent être en mesure de fournir un couple élevé à bas régime, avec un facteur de puissance aussi proche que possible de l'unité, et tourner à haute vitesse avec le plus grand rendement possible, avec des contraintes sur son coût et son volume. Pour surmonter ce problème, la machine synchrone à commutation flux à double excitation (mscfde) est intéressante car elle permet des performances en couple comparables aux meilleures machines synchrones à aimants permanents et minimise les pertes fer à haute vitesse grâce à son système d'excitation hybride. Comme les autres machines alternatives (asynchrones et synchrones), cette machine est associée à un onduleur de tension classique à deux niveaux. A faible vitesse de rotation pour la commande en couple, une commande en courant est nécessaire pour minimiser les pertes et l'ondulation de couple, et maximiser le facteur de puissance. Pour des vitesses plus élevées, une commande en pleine onde de tension maximise la puissance convertie. Cette commande ne nécessite pas de circuits de régulation de tension, il n'y a pas de commande MLI et les courants sont de forme sinusoïdale, car ils sont filtrés avec les impédances (inductives) de la machine. Cette commande en pleine onde de tension permet aussi de minimiser les pertes dans le fer. En fait, les courants absorbés créent une réaction magnétique d'induit qui tient compte de toutes les composantes harmoniques de tension. Dans la partie 2, il est rappelé quelques éléments de la théorie pour comprendre la commande en tension, et nous montrons que cette commande permet d'obtenir une conversion de puissance maximale. La partie 3 décrit la mscfde avec aimants permanents ferrite. La partie 4 décrit les performances obtenues avec cette machine commandée avec une commande en pleine onde de tension. Enfin, dans la partie 5, nous présentons une solution originale pour augmenter la puissance convertie et ainsi d'augmenter la plage de vitesse.

2. Éléments de théorie de la commande en tension

Dans cette partie, seront rappelées les formulations permettant d'établir l'expression de la puissance maximale convertible par une machine synchrone alimentée par un onduleur de tension.

3. Présentation de la machine synchrone à commutation de flux à double excitation

Dans cette partie, nous présentons la machine synchrone à commutation de flux à double excitation. Il y a une présentation du principe de fonctionnement de cette machine, une présentation des performances en fonction du type d'aimants permanents et des caractéristiques de la machine avec des aimants permanents ferrite.

4. Conversion d'énergie maximale

4.1 Présentation des grandeurs expérimentales

Dans cette partie, nous présentons certaines grandeurs physiques expérimentales: Ch1: signal de commande, Ch2: tension phase-neutre, Ch3: courant Ch4: image de la fem.

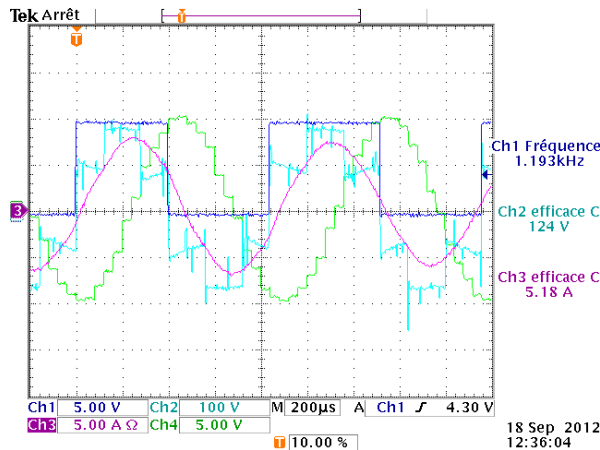


Figure 1 : Grandeurs expérimentales à 3600 tr/min

4.2 Détermination expérimentale de la puissance maximale convertible

Pour déterminer la puissance convertie par la machine électrique, nous mesurons la puissance en entrée du convertisseur au niveau du bus continu (valeur de la tension du bus à courant continu et mesure de la valeur moyenne du courant d'entrée de l'onduleur). Avec la mesure des valeurs efficaces des courants de phase, les pertes de l'onduleur sont calculées en supposant que les transistors MOSFET à l'état fermé se comportent comme des résistances ayant une valeur de 500 mΩ. Les pertes de cuivre dans la machine sont également déterminées, connaissant les valeurs des résistances des phases (1,8 Ω à 80 ° C).

La puissance convertie est la différence entre la puissance d'entrée mesurée au niveau du bus DC et les pertes du convertisseur et les pertes de cuivre.

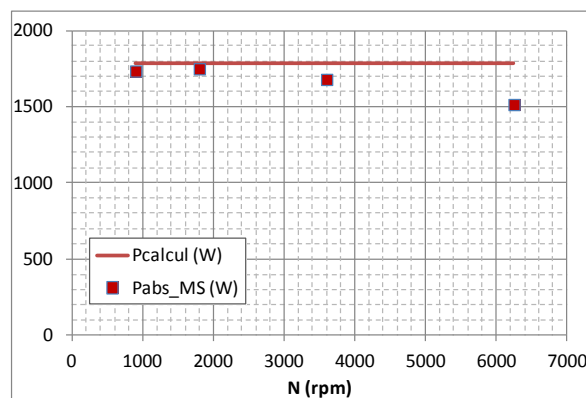


Figure 2 : Puissance convertie en fonction de la vitesse de rotation

Il convient de noter que la courbe théorique est déterminée avec une valeur de tension du bus DC constante, indépendamment de la charge, mais dans la pratique, cette tension diminue, surtout au point de vitesse maximale, car dans ce cas la machine synchrone est seule et toute la puissance est fournie par le bus continu.

5. Proposition pour augmenter la puissance convertible

5.1 Présentation de la proposition

Nous proposons que chaque bobine soit constituée de deux moitiés de bobine qui peuvent être connectées, soit en série, soit en parallèle. Dans ce dernier cas, la conséquence est que le nombre effectif de tours est réduit de moitié. Si les demi-bobines sont en série, le nombre effectif de tours est de 60 et le maximum de puissance convertible est de 1780 W. Si les demi-bobines sont en parallèle, le nombre effectif de tours est de 30 et le maximum de puissance convertible de 3560 W.

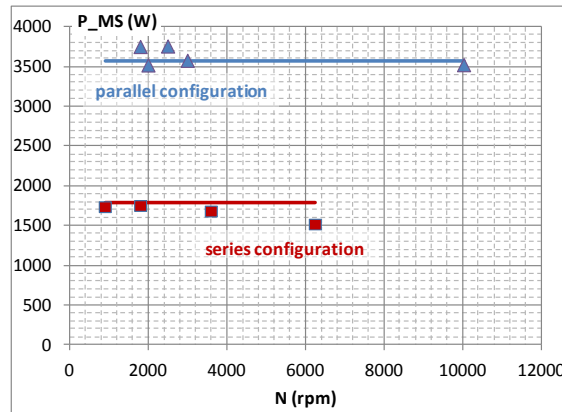


Figure 3 : Puissance convertie en fonction de la vitesse de rotation pour les deux configurations des bobinages

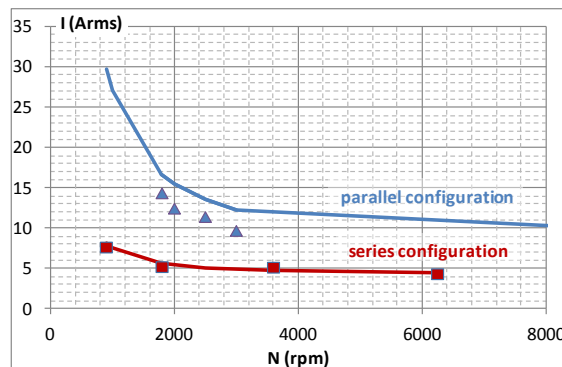


Figure 4 : Evolution de la valeur efficace des courants en fonction de la vitesse pour les deux configurations

6. Conclusion

Dans cet article, les capacités de conversion d'énergie d'une machine synchrone alimentée par un onduleur de tension en mode pleine onde de tension sont vérifiées expérimentalement. Il a été montré que la vitesse maximale est atteinte lorsque la puissance convertie est utilisée pour compenser les pertes mécaniques et les pertes de fer. Nous proposons une solution pour augmenter la puissance convertie et par conséquent la vitesse maximale de rotation. Cette solution nécessite une reconfiguration des enroulements (série-parallèle) électriquement réalisable. Dans une application de motorisation de véhicule hybride ou électrique, la configuration série associée à une commande en courant sera utilisée à basse vitesse de rotation, pour assurer une maximisation du facteur de puissance et la configuration parallèle associée à une commande en pleine onde de tension pourra être utilisée à haute vitesse de rotation pour une augmentation de la puissance convertie et par conséquent de la plage de vitesse de rotation.

7. Références

- [1] Jahns, T.M., "Flux-weakening regime operation of an interior permanent-magnet synchronous motor drive", IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, Issue 4, pp. 681-689.
- [2] Schiferl, R. et Lipo, T.A., "Power capability of salient pole permanent magnet synchronous motors in variable speed drive applications." IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, vol 26, n°1, pp. 115-123, January/february
- [3] Soong, W.L. et Ertugrul, N., "Field-weakening performance of interior permanent-magnet motors." Industry Applications, IEEE Transactions on, s.l. : IEEE, 2002, Issue 5, Vol. 38, pp. 1251-1258.

- [4] M. van der Geest, H. Polinder, J.A. Ferreira, D.Zeilstra. "Design Considerations for Hybrid-Excited Flux-Switching Machines".
- [5] E. Hoang, M. Lecrivain, M. Gabsi. "A new structure of a switching flux synchronous poly-phased machine with hybrid excitation". EPE-2007 Conference, Aalborg, September 2007.
- [6] K. Shingo, K. Kubo, T. Katsu, Y. Hata, "Development of Electric Motors for the TOYOTA Hybrid Vehicle "PRIUS". Toyota motor corporation.
- [7] Stumberger, B., Hamler, A. et Hribernik, B., "Analysis of iron loss in interior permanent magnet synchronous motor over a wide-speed range of constant output power operation." *Magnetics, IEEE Transactions on*, : IEEE, 2000, Issue 4, Vol. 36, pp. 1846-1849.
- [8] Yahia, H., Dhifaoui, R. et Multon, B., "Maximum power limits in the field-weakening mode of doubly-salient variable reluctance machines." 2002. *IEEE*. Vol. 2, pp. 783-788.
- [9] Zhu, ZQ, Chen, YS et Howe, D., "Online optimal flux-weakening control of permanent-magnet brushless AC drives." *IEEE Transactions on Industry Applications*, s.l. : IEEE, 2002, Issue 6, Vol. 36, pp. 1661-1668.
- [10] L. Schwager, A. Tüysüz, C. Zwyssig, J. W. Kolar, "Modeling and Comparison of Machine and Converter Losses for PWM and PAM in High-Speed Drives." *Conference ICEM-2012*.