

Comparaison des pertes dans une chaîne de traction conventionnelle et dans une chaîne de traction avec onduleur à batterie distribuée.

R. Jardot, A. Lahlou, G. Krebs, F. Roy and C. Marchand
Email : remi.jardot@centralesupelec.fr

Résumé—Au cours de la dernière décennie, les constructeurs automobiles ont électrifié la chaîne de traction de leurs véhicules. Bien que ces véhicules attirent de plus en plus de conducteurs, la plupart ont une autonomie en deça des attentes et sont excessivement coûteux. Les fabricants doivent donc proposer des chaînes de conversion haute performance (notamment en termes d'efficacité) tout en maîtrisant les coûts. Le convertisseur de puissance est un élément crucial de ces chaînes : il alimente le moteur. Sa structure et sa commande peuvent grandement influencer l'efficacité globale de la transmission. Cet article étudie deux structures de conversion, modélisées et associées à une machine électrique. La première est un onduleur classique triphasé, et la seconde est une architecture novatrice appelée IBIS (Intelligent Battery Integrated System). Cette batterie intègre directement la fonction de conversion, réduisant ainsi les coûts matériels. Les pertes dans chaque structure de conversion sont calculés dans cette étude et comparés sur cycle routier.

I. INTRODUCTION

Les enjeux environnementaux imposent une transition des groupes motopropulseurs thermiques aux groupes électriques [1]. Le groupe motopropulseur électrique, complexe, subit des pertes lors des conversions d'énergie. L'optimisation des composants électroniques, magnétiques et mécaniques est cruciale [2]. Des avancées matérielles (feuilles magnétiques fines, composants en carbure de silicium) et des lois de commande peuvent accroître l'efficacité. L'architecture novatrice "IBIS" offre une alternative à la connexion classique des cellules de batterie, réduisant les problèmes de connectivité et améliorant la réparabilité [3]. Cette étude modélise les pertes dans deux convertisseurs de puissance : un onduleur conventionnel et l'architecture IBIS. Elle vise à orienter les industriels en analysant les pertes selon ces architectures pour des améliorations futures, abordant ainsi les coûts, l'efficacité énergétique et les avancées technologiques.

II. STRUCTURE DE CONVERSION

Pour l'architecture classique, l'objectif est de créer des signaux de tension rectangulaires à l'aide de la modulation de largeur d'impulsion (MLI). Un onduleur triphasé typique se compose de plusieurs cellules de commutation recevant des signaux de commande du bloc PWM.

La création d'une tension sinusoïdale peut également être obtenue en combinant plusieurs cellules de batterie de commutation en série. On obtient ainsi une tension de sortie à plusieurs niveaux, similaire à une conversion analogique-numérique d'un signal sinusoïdal. L'architecture IBIS, développée au sein de Stellantis, a un objectif similaire à l'architecture des onduleurs multiniveaux. Cette architecture permet d'obtenir une tension de sortie plus élevée que la tension supportée par chaque interrupteur, avec le même

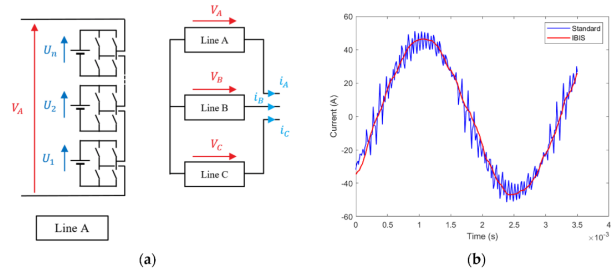


FIGURE 1. a. Structure de conversion IBIS. b. Signaux en entrée de la machine électrique

nombre de cellules dans une architecture classique. Cette architecture IBIS est illustrée en figure 1. Elle offre également une plus grande modularité et un contrôle plus précis que l'architecture classique. Cette architecture est composée de trois lignes indépendantes différentes et chaque ligne est composée de plusieurs cellules de batterie associées à une structure de conversion basse tension. La figure 1 montre deux ondes de courant à la sortie d'un onduleur conventionnel et d'une architecture IBIS pour une phase. L'ampleur de l'effet de hachage dépend du point de fonctionnement choisi : une vitesse plus élevée implique une fréquence plus élevée, et une demande de couple plus élevée implique une amplitude de courant plus élevée.

TABLE I
COMPARAISON DES RENDEMENTS CONVERTISSEUR

Barycentres (Nm, tr/min)	Conventionnelle (rendement)	Distribuée (rendement)	Gain (Δ rendement)
(10,853) - 448pts	82.6	99.4	16.8
(15,5216) - 453pts	96.9	99.4	2.4
(17, 9434) - 263pts	96.7	99.8	3.1
(57,4540) - 42pts	97.9	98.4	0.5
(59,2080) - 89pts	95.8	97.0	1.2
Cycle total	95.8	99.1	3.3

Les résultats ci-dessus ont été simulés à l'aide de la modélisation acausale de la chaîne de traction électrique dans Simulink. Les différentes étapes de conversion ont été modélisées à l'aide de blocs de commutation et la fonction de stockage à l'aide de blocs élémentaires Simulink. L'objectif est d'obtenir un les pertes dans l'étage de conversion et un profil de courant qui peut être utilisé dans la modélisation FEM de la machine. On observe un écart de 3.3 points de rendement sur l'ensemble du cycle WLTC entre les deux structures, soit en comptant l'énergie récupérée au freinage 6.8 % d'autonomie en plus.

III. MACHINE ELECTRIQUE

A. Présentation de la machine

L'application proposée dans l'introduction est une machine électrique de type synchrone à aimants permanents. En effet, l'application automobile citée ici nous a conduit à faire ce choix industriel et à proposer une machine permettant des vitesses élevées tout en garantissant un rendement important. La machine synchrone étudiée ici, comme le montre la figure 2, est plus compacte et plus efficace que les machines asynchrones dans la plupart des cas.

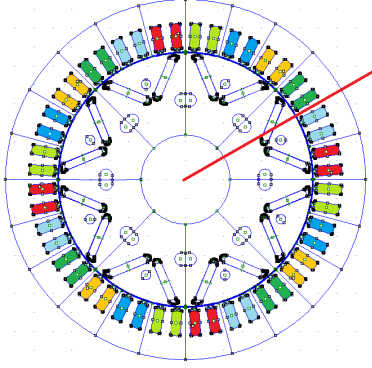


FIGURE 2. Machine synchrone à aimants permanents utilisés

B. Pertes dans la machine

Les pertes dans une machine électrique peuvent être classées en plusieurs groupes : les pertes mécaniques, dues aux frottements et à la vitesse de la machine, les pertes électriques dans les bobinages situés dans les encoches du stator de la machine (pertes cuivre, composées de pertes AC et DC), et les pertes magnétiques dans les différentes parties ferromagnétiques du moteur électrique (pertes fer), qui se divisent en pertes par courants de Foucault et pertes par hystérésis. Les pertes dans les aimants sont négligées ici. Les pertes fer sont calculées grâce à l'utilisation d'un modèle éléments finis de la machine électrique. Ce modèle est alimenté par les courants instantanés en sortie de la stratégie de conversion utilisée. A partir de l'induction dans la machine, les pertes fer sont calculées par harmoniques suivant une hypothèse de linéarité des pertes par rapport à la fréquence [4] [5]. La formulation de Steinmetz sera utilisé pour chaque élément du maillage et pour chaque fréquence :

$$p_{fer} = [k_{h1}(2B_m) + k_{h2}(2B_m)^2]f + 2\pi^2\alpha_p B_m^2 f^2 \quad (1)$$

L'erreur faite en prenant cette hypothèse ne sera pas un problème étant donné que l'on s'intéresse à une différence de pertes entre les structures. Le calcul des pertes cuivre est basé sur la modélisation par éléments finis magnétostatique de l'ensemble de la machine. On l'utilise pour alimenter un deuxième maillage plus fin de l'encoche, grâce à une interpolation des quantités magnétiques d'un maillage à un autre (méthode mortar). Grâce à un calcul magnétodynamique classique on obtient la densité de courant [6]. Les pertes cuivre (AC et DC) sont calculées sur toute la surface de l'encoche.

TABLE II
COMPARAISON DES RENDEMENTS MACHINES

Barycentres (Nm, tr/min)	Conventionnelle (rendement)	Distribuée (rendement)	Gain (Δ rendement)
(10,853) - 448pts	83.4	89.2	5.9
(15,5216) - 453pts	95.8	98.0	2.2
(17, 9434) - 263pts	90.4	93.5	3.1
(57,4540) - 42pts	96.6	97.5	0.9
(59,2080) - 89pts	95.2	96.1	0.9
Cycle total	92.2	95.0	2.8

Le tableau numéro 2 présente les rendements simulés de la machines électriques pour différents points de fonctionnement, représentant les barycentres d'un cycle WLTC réduit. Pour le cycle total, l'écart de rendement entre les deux structures est de 2.8 points. En comptant la récupération d'énergie au freinage, le gain en autonomie est de 5.6 %.

IV. CONCLUSION

Dans ce papier, une modélisation par éléments finis d'une machine synchrone couplée à une structure innovante de batterie intégrant la fonction de conversion a été présentée. Une modélisation des pertes dans le convertisseur a été utilisée afin d'obtenir une comparaison des rendements des deux structures. Au total, sur les barycentres d'un cycle WLTP réduit le gain de rendement va de 1.3 points à presque 30 points de rendement. Sur l'ensemble du cycle WLTP, le gain total est de 12 %, soit 47 km d'autonomie pour un véhicule citoyen possédant classiquement une autonomie WLTP de 400 km. En outre, il reste à prendre en compte les pertes dans les cellules de batteries, ce qui pourrait baisser le gain total.

A. Remerciements

Cette étude a été effectuée dans le cadre de l'OpenLab PSA@Paris-Saclay « Electrical Engineering for Mobility » et du projet IBIS, lequel est financé par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) grâce au programme d'Investissement d'Avenir (PIA).

RÉFÉRENCES

- [1] M. Zeraoulia, M. Benbouzid, and D. Diallo, "Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems : A comparative study." *IEEE Transactions on Magnetics and Institute of Electrical and Electronics Engineers*, pp. 1756–1764, 2006. [Online]. Available : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00523504>
- [2] G. Krebs, E. de Cecco, and C. Marchand, "Design approach of an axial flux motor for electrical powertrain vehicle," in *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, 2012, pp. 2812–2817.
- [3] F. ROY, "Ibis (intelligent battery integrated system)," *ADEME, PSA GROUPE*, 2019. [Online]. Available : <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/683-ibis-intelligent-battery-integrated-system.html>
- [4] A. Krings and J. Souldard, "Overview and comparison of iron loss models for electrical machines," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 10 (3), pp. 162–169, 2010.
- [5] H. Zhao, C. Ragusa, O. de la Barrière, M. Khan, C. Appino, and F. Fiorillo, "Magnetic loss versus frequency in non-oriented steel sheets and its prediction : Minor loops, pwm, and the limits of the analytical approach." *IEEE Transactions on Magnetics, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, p. 53 (11), 2017. [Online]. Available : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01726122>
- [6] F. B. C. M. M. Al Eit, P. Dular and G. Krebs, "Perturbation finite element method for efficient copper losses calculation in switched reluctance machines," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, 2017.