

Étude et Dimensionnement d'une Machine Synchrone pour un Convertisseur Distribué dans la Batterie

Rémi Jardot^{1,2}, Guillaume Krebs¹, Anas Lahlou³, Francis Roy², Oliver de la Barrière⁴, Claude Marchand¹

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

² Stellantis, Centre Technique de Carrières-sous-Poissy, 212 Boulevard Pelletier, 78955, Carrières-sous-Poissy, France.

³ SAFT, 111-113, boulevard Alfred Daney, 33074 Bordeaux, France

⁴ Laboratoire SATIE, CNRS/ENS Paris Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette

RESUME -Depuis les dernières décennies, les constructeurs automobiles ont électrifié la quasi-totalité de leurs gammes de véhicules, mais la plupart de ces véhicules offrent une autonomie et une efficacité parfois limitées. C'est pourquoi il est nécessaire pour les constructeurs de proposer des chaînes de conversion plus performantes tout en maîtrisant les coûts de celles-ci. De nombreuses chaînes non-conventionnelles sont donc à l'étude. Cet article traite tout d'abord de l'impact d'une structure innovante de conversion d'énergie électrique sur les pertes induites dans la machine utilisée. Puis il sera question de l'impact de cette structure sur la conception de la machine et sur l'efficacité de la chaîne de traction d'un véhicule électrique. Deux structures de conversion sont modélisées et associées à une machine synchrone : une structure classique composée d'un convertisseur triphasé et d'une architecture dénommée IBIS (Intelligent Batteries Integrated System), où la fonction de conversion électrique est distribuée dans l'ensemble de la batterie. L'objectif est de mettre en avant la diminution des pertes induites dans la machine pour la structure IBIS et d'optimiser la conception de la machine étudiée. L'étude est construite sur la base du cycle routier WLTC.

Mots-clés—Machine synchrone à aimants permanents, pertes, chaîne de traction, convertisseur, véhicule électrique.

1. INTRODUCTION

Les problématiques environnementales et les contraintes réglementaires ne permettent plus une continuité dans le développement des chaînes de traction thermiques et cela au profit des chaînes de traction électriques [1]. Une chaîne de traction électrique est un ensemble complexe de systèmes en interaction constante. Dans les plus classiques de celle-ci, une batterie électrique alimente, par le biais d'un convertisseur DC-AC, une machine électrique triphasée. A chaque étape de conversion, des pertes sont générées et de nombreux phénomènes physiques perturbateurs ont lieu (bruit, problème de comptabilité électromagnétique, ...). Le choix d'une structure de chaîne de traction électrique peut exercer une grande influence sur les pertes et ces phénomènes [2]. Aussi, l'efficacité des systèmes peut être améliorée à travers le développement de nouveaux algorithmes de commande ou de nouveaux composants optimaux.

Il existe un intérêt croissant pour la recherche et la conception de batteries, convertisseurs et machines électriques. Les axes d'amélioration concernent la réduction des coûts de fabrication, l'efficacité énergétique de ces systèmes [3] et l'étude de nouvelles architectures de traction [4], [5]. C'est

dans ce contexte que la structure d'alimentation « IBIS » [6]–[8] a été développée. C'est une architecture d'alimentation et de conversion non-conventionnelle, à l'instar de nombreuses chaînes de ce genre à l'étude [9], permettant la récupération d'un signal triphasé directement en sortie du bloc fonctionnel de stockage électrique et l'application de tensions moins riches en harmoniques aux bornes de la machine. Elle permet aussi, grâce à la présence de clusters de cellules définis, une modularité et une certaine robustesse de la fonction de stockage.

L'impact de cette architecture non-conventionnelle sur les pertes dans la machine et sur la chaîne de traction n'a pas encore été évalué. Il en est de même des caractéristiques d'IBIS sur le dimensionnement de la machine électrique. L'objectif de ces travaux est donc d'étudier ces différents aspects. Une première partie est consacrée à la modélisation par éléments finis d'une machine synchrone et à la stratégie de commande utilisée. Ensuite, une deuxième partie présente les structures de conversion étudiées dans ce papier : la structure de chaîne de traction classique et la structure IBIS. Une troisième partie est consacrée à l'étude des pertes induites dans la machine. Enfin une dernière partie propose un dimensionnement de la machine obtenue par optimisation.

2. MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE

2.1. Modèle de la machine

La chaîne de traction étudiée inclue une machine synchrone à aimants permanents, présentée en Fig. 1. Cette machine est actuellement proposée dans certains véhicules du parc automobile mondial.

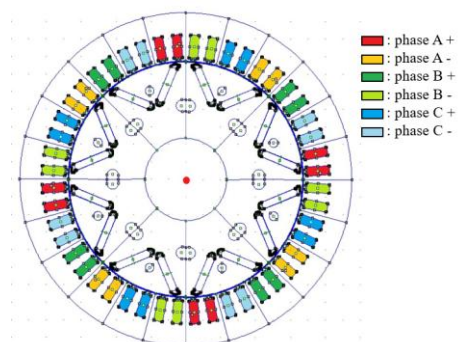


Fig. 1. Machine synchrone à aimants permanents

Le rotor comprend plusieurs aimants disposés en concentration de flux. Les cartographies de pertes de ce type de machine montrent en général une meilleure efficacité énergétique à basse et moyenne vitesses et une meilleure densité de puissance que les machines à rotor bobiné. Les caractéristiques de la machine utilisée sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques de la machine synchrone utilisée

Nombre de phases	3
Nombre de paires de pôles	4
Nombre d'encoche par phase	2
Rayon extérieur stator	95 mm
Rayon extérieur rotor	66.5 mm
Largeur d'entrefer	1 mm
Longueur du moteur	175 mm
Champ coercitif des aimants	878912.4

Une modélisation sur Matlab-Simulink faite à partir de cartographies de fonctionnement et un modèle « dq » est utilisée afin de mettre en place la stratégie de contrôle de la machine. La modélisation par éléments finis de la machine est alimentée grâce à une stratégie de contrôle MTPA (Maximum Torque per Ampere) [10], [11], selon l'équation (1) dans le repère de Park.

$$\begin{cases} I_d = \frac{\Phi_f - \sqrt{\Phi_f^2 + 8 * (L_d - L_q)^2 * I_{norm}^2}}{-4 * (L_d - L_q)} \\ I_q = \sqrt{I_{norm}^2 - I_d^2} \end{cases} \quad (1)$$

La machine est ensuite modélisée sous Matlab par la méthode des éléments finis (MEF) et en magnéto-statique (application de courants calculés pour chaque point de fonctionnement considéré [3]). Ainsi les grandeurs électriques et magnétiques sont calculées pour tous les éléments du maillage. La modélisation est utilisée pour les calculs des pertes de la machine et pour la simulation de son fonctionnement. Le courant de phase de la machine, issu du modèle « dq », possède différentes caractéristiques selon la structure de conversion adoptée. La Fig. 2 présente un comparatif des courants issus d'une structure de conversion classique, mettant en œuvre une fréquence de commutation à 10 kHz, et de la structure IBIS, comparable en résultat à une structure multi-niveau, pour le point de fonctionnement 15 Nm – 5 216 tr/min.

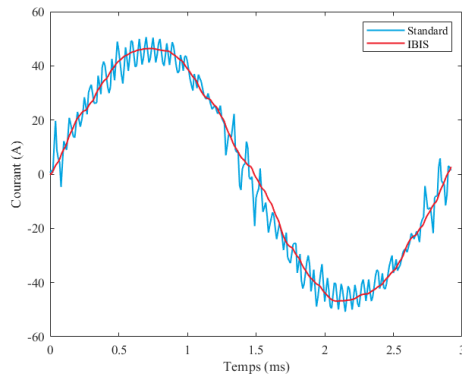


Fig. 2. Courant de phase de la machine pour deux structures de conversion (15 Nm, 5216 tr/min)

L'effet du découpage à 10kHz est assez visible pour la structure classique et a pour conséquence une ondulation non négligeable du courant. Le courant en sortie de l'architecture

IBIS n'a pas cette caractéristique et possède un contenu harmonique très pauvre.

2.2. Détermination des points de fonctionnement

Une approche conventionnelle dans la conception de machine électrique est le calcul de l'efficacité d'une machine pour un ensemble de points de fonctionnement [12]. Pour réduire le temps de calcul, dû au grand nombre de point de fonctionnement d'une machine sur cycle, il est possible d'utiliser une méthode de réduction de cycle routier [13], [14]. La méthode qui sera utilisé ici est celle des barycentres. L'ensemble des points de fonctionnement est scindé en plusieurs groupes de points, tous représentés par leur barycentre respectif. Cette méthode à le désavantage d'induire une erreur relative mais qui a été démontré assez faible [3]. La Fig. 3 présente le découpage d'un cycle WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles) en plusieurs clusters représentés par un barycentre.

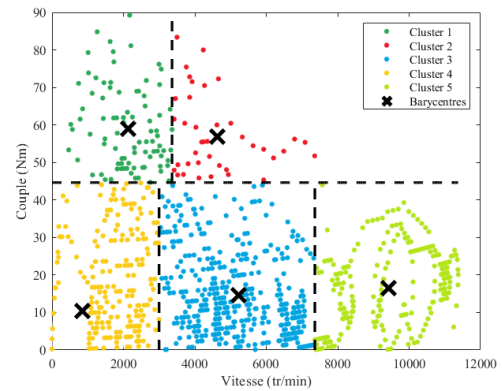


Fig. 3. Barycentres du cycle WLTC utilisé

Le cycle WLTC propose l'avantage de mêler un grand nombre de style de route (ville, route, autoroute) et donc propose des points de fonctionnement représentant au maximum le fonctionnement réel.

3. STRUCTURES DE CONVERSION UTILISEES

L'architecture classique utilisée est l'association d'une batterie électrique avec un onduleur triphasé. Il est composé d'un ensemble d'interrupteurs commandés en PWM (Pulse Width Modulation) [15].

La structure IBIS a comme particularité la distribution de la fonction de conversion au sein du bloc fonctionnel de stockage d'électricité. Les trois signaux sinusoïdaux composant le signal triphasé sont chacun créés par une ligne de cellules indépendante. Chaque ligne est quand-à-elle composée d'un ensemble de cluster de cellules de batterie associées à un étage de conversion propre à chaque cluster, comme la montre la Fig. 4.

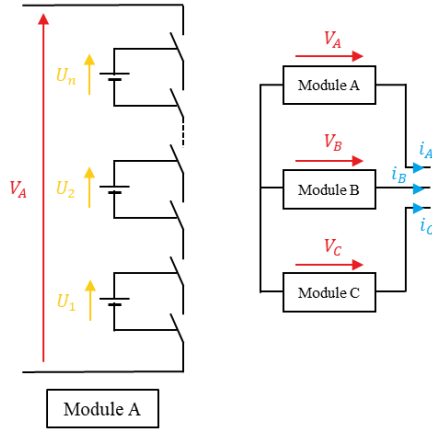


Fig. 4. Schéma de principe de la structure IBIS

Le résultat en sortie de la chaîne IBIS est proche de celui d'un étage de conversion multi-niveau. Les ondes sinusoïdales de tension sont créées à partir d'une commande permettant l'ajout ou le retrait de certains clusters au cours du temps en fonction des besoins. La Fig. 5 présente la tension de phase de la machine pour la structure de conversion classique et celle IBIS pour un point de fonctionnement de 17 Nm – 9 434 tr/min. La tension de la structure IBIS est comparable à celle d'une architecture multi-niveau et permet de récupérer un signal sinusoïdal avec beaucoup moins d'harmonique que celle de la structure classique.

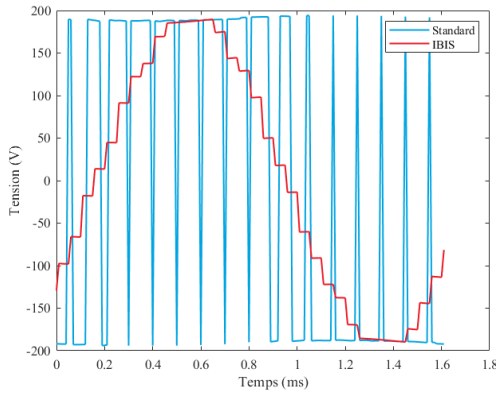


Fig. 5. Tension de phase de la machine pour deux structures de conversion (17 Nm, 9434 tr/min)

4. PERTES DANS LA MACHINE

Les pertes dans une machine électrique peuvent être classifiées en trois grands groupes :

- Les pertes mécaniques, dues aux frottements et à la vitesse de la machine.
- Les pertes électriques dans les encoches de la machines ou pertes cuivre (composées des pertes dites AC et DC [16].
- Les pertes magnétiques dans les différents matériaux ferromagnétiques de la machines, composées des pertes par courants de Foucault et des pertes par hystérésis, aussi appelées pertes fer. Elles sont causées par la réorientation des moments magnétiques dans le matériau et la présence de courants induits.
- Les pertes dans les aimants, qui seront négligées ici.

Dans cette étude, seule une estimation des pertes magnétiques et des pertes électriques sera menée.

4.1. Estimation des pertes fer

L'estimation des pertes fer dans la machine est basée sur l'utilisation du modèle éléments finis implémenté sur Matlab [17], [18]. Ce modèle de machine est alimenté par les courants en sortie de la structure de conversion utilisée, modélisé sous Matlab-Simulink grâce à une représentation « dq ». La discrétisation spatiale du modèle éléments finis permet de retrouver localement la valeur de l'induction sur toute la machine. Un choix adéquat de la taille de maillage est nécessaire afin de pouvoir concilier une bonne précision et des temps de calculs acceptables. Après avoir récupéré l'induction dans la machine pour chaque élément du maillage et pour chaque pas de temps, la transformée de Fourier est appliquée. En y retranchant le bruit associé aux calculs numériques, le spectre en fréquence des inductions peut être utilisé afin d'estimer la valeur des pertes fer dans la machine. Les pertes fer sont issues d'une cartographie en inductions et fréquences et une hypothèse forte de linéarité des pertes dans le domaine fréquentiel sont utilisées [19]–[21]. Le modèle de perte de Steinmetz est appliqué à un essai magnétique sur un matériel présentant la même profondeur que les tôles utilisées dans la machine (0.35mm). Le modèle de Steinmetz est le suivant :

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

La Fig. 6 présente l'estimation des pertes fer totales en fonction de la fréquence pour un convertisseur classique avec une fréquence de découpage à 10kHz, pour un point de fonctionnement 60 Nm – 2000 tr/min. L'effet du découpage est conséquemment visible sur l'estimation des pertes fer en fonction de la fréquence.

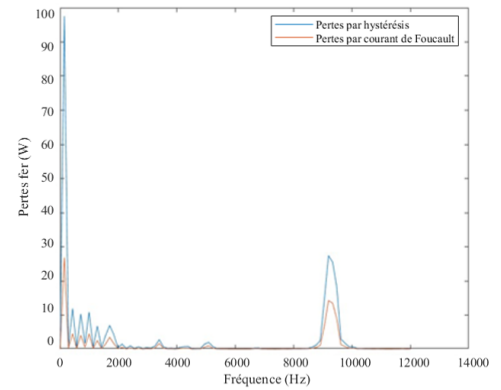


Fig. 6. Pertes fer dans la machine alimentée par une structure classique avec une fréquence de découpage de 10 kHz (60 Nm, 2000 tr/min)

En partant du principe d'une comparaison entre les deux structures, la différence entre les deux valeurs de perte importe plus que l'erreur due à l'hypothèse faite. Qui plus est, sur des fréquences relativement faibles, les hypothèses faites semblent appropriées [22]–[24].

4.2. Estimation des pertes cuivre

L'estimation des pertes cuivre dans la machine a été menée grâce à l'utilisation de la modélisation éléments finis déjà proposée. La résolution magnéostatique déjà utilisée est couplée avec une résolution magnétodynamique locale appliquée aux encoches seules [25]. Un deuxième maillage est effectué dans une encoche de la machine avec des conditions aux limites reprenant la résolution magnéostatique sur l'ensemble de la machine. Les quantités de chaque élément sont interpolées du maillage complet de la machine au maillage de l'encoche. La densité de courant estimée pour l'architecture

standard est présentée en Fig. 7 pour le point de fonctionnement 25 Nm - 5500 tr/min.

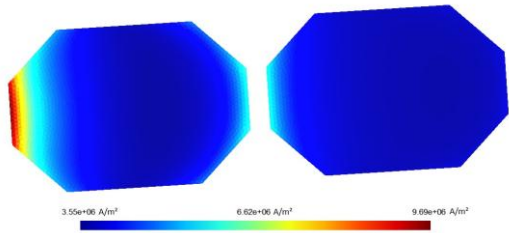


Fig. 7. Densité de courant dans une encoche (25 Nm, 5500 tr/min)

Cette procédure permet de calculer directement les pertes cuivre (pertes AC comprises) dans une encoche.

4.3. Comparaison des pertes par structure

Au final, les pertes induites dans la machine et l’efficacité de chaque structure peuvent être calculées. Ces résultats sont résumés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Comparaison des pertes dans la machine

Barycentres (Nm - tr/min)	Structure classique (W)	Structure IBIS (W)	Gain
(10 - 853)	167	100 W	40 %
(15 - 5216)	764	679 W	11 %
(17 - 9434)	1930	1525 W	21 %
(57 - 4540)	1136	995 W	12 %
(59 - 2080)	554	494 W	11 %
Cycle	285 Wh	233 Wh	18 %

On observe la diminution la plus importante des pertes fer pour les points de fonctionnement à faibles vitesses et faibles couples (41% pour le point 10 Nm – 853 tr/min). Pour les pertes cuivre, la diminution la plus éloquent est pour les points de fonctionnement à hautes vitesses (70% pour le point de fonctionnement 17 Nm – 9434 tr/min). L’étude faite montre bien des avantages certains pour la structure IBIS, se répercutant sur les valeurs de pertes induites dans la machine. Le contenu harmonique du courant, et donc de l’induction, est plus riche pour la structure de conversion classique, ce qui peut expliquer une différence nette dans les pertes.

5. OPTIMISATION DE LA MACHINE SYNCHRONE

La structure de conversion développée donne lieu à une augmentation de la tension de phase maximale atteignable en entrée de la machine d’environ 15 % par rapport à une architecture classique (batterie 400V). L’amplitude de la tension en sortie de la batterie IBIS est directement égale à la capacité maximale de chaque ligne de clusters, contrairement à la structure classique qui induit par le convertisseur une tension plus faible pour un même nombre de cellule de batterie [8]. Cette augmentation permet un dimensionnement différent de la chaîne de traction, pour répondre aux mêmes exigences automobiles.

L’objectif de l’étude est d’atteindre des performances dynamiques longitudinales équivalentes (couple et vitesse maximales à la roue) en jouant sur plusieurs paramètres de la chaîne de traction : rapport de réduction, longueur, nombre de spires et rayon de la machine. Ces paramètres seront ceux de l’optimisation. Le gain en tension apporté par la structure IBIS, associé d’une augmentation du rapport de réduction, permet d’envisager une réduction du volume de la machine. Une première étude de sensibilité sur le rapport de réduction montre

l’intérêt dans la diminution des pertes de cette optimisation. La Fig. 8 présente l’évolution de l’énergie perdue dans la machine sur l’ensemble d’un cycle WLTC en fonction du rapport de réduction et du volume de la machine.

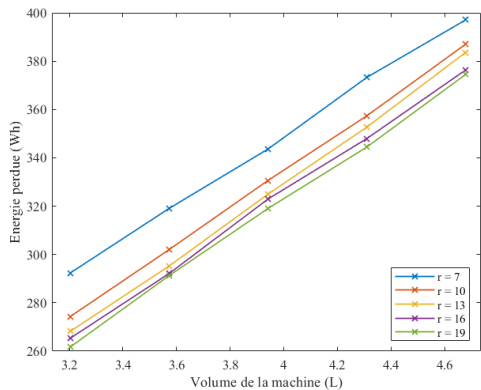


Fig. 8. Energie perdue dans la machine en fonction du rapport de réduction et du volume de la machine

On observe une diminution de l’énergie perdue pour un rapport de réduction plus élevé ou un volume de machine moins important.

L’algorithme d’optimisation DIRECT [26]–[28], est utilisé afin de minimiser le volume de la machine avec les paramètres d’optimisation précisés précédemment. L’équation (3) présente la fonction objectif et la fonction contrainte du problème d’optimisation étudié ici.

$$\begin{cases} F_{obj} = L_{machine}\pi R_{machine}^2 \\ F_{cont} = C_{max} - C(I = I_{max}) \end{cases} \tag{3}$$

L’optimisation se fera sur le volume de la machine, fonction de la longueur de la machine ($L_{machine}$) et du rayon ($R_{machine}$) de celle-ci, avec comme contrainte d’optimisation le couple à la roue maximal exigé. Les contraintes physiques sont déjà prises en compte dans la modélisation FEM.

Une autre contrainte à prendre en compte est la vitesse maximale de la machine, mécaniquement admissible. La machine électrique produite actuellement et prise en référence présente une vitesse maximale de rotation de 14 000 tr/mn. Le gain en tension de phase de la chaîne de traction IBIS permet d’augmenter cette valeur dans la limite de ce qu’il est possible de faire mécaniquement sans remettre en cause profondément la technologie de la chaîne cinématique. Une augmentation du rapport de réduction à 11.9 parait ainsi réaliste avec une vitesse maximale de la machine électrique de l’ordre de 17 000 tr/mn. Dans cette hypothèse, on obtient grâce à l’algorithme d’optimisation, les caractéristiques présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Paramètres des machines étudiées

	Machine existante	Machine IBIS optimisée	
Rapport de réduction	9.8	11.9	
Nombre de spires	2	2	
Rayon d’alésage du rotor	0.0665 m	0.0665 m	
Longueur de la machine	0.175 m	0.144 m	
Volume	4.96 L	4.08 L	- 17.7%
Énergie perdue sur cycle	381.8 Wh	331.7 Wh	- 13.1%

On constate que la machine optimisée pour la structure IBIS présente un volume moins important, de 17.7%, que la machine existante, bénéficie provenant de la réduction de la longueur. On note également une diminution des pertes sur cycle de l'ordre de 13%, conséquence de la diminution de la longueur de la machine et de la faible teneur en harmonique des ondes de courant générées par l'onduleur multi-niveau distribué dans la batterie.

6. CONCLUSION

Dans cette étude, une modélisation par éléments finis d'une machine synchrone à aimants permanents a été développée. Cette modélisation a permis d'effectuer des calculs magnétostatiques et magnétodynamiques, dans le but d'estimer les valeurs des grandeurs électriques et magnétiques dans la machine. Une estimation basée sur ces calculs a été réalisée sur un ensemble de points représentant un cycle routier WLTC. Cette première partie du travail a permis le développement d'une modélisation de chaîne de traction entière, couplée avec un algorithme d'estimation des pertes dans la machine. Finalement, il a été possible de montrer l'avantage de la structure IBIS au niveau des pertes induites dans la machine. Sur un cycle routier WLTC, le gain apporté est de l'ordre de 18% des pertes fer et pertes cuivre dans la machine. La machine électrique couplée à la structure classique possède un rendement sur cycle de 90.5 contre 92.2 pour la machine couplée avec la structure IBIS.

Ensuite, une méthode d'optimisation de machine électrique permettant l'adaptation à une source d'alimentation innovante a été développée à partir d'une modélisation par éléments finis de la machine synchrone. Elle a permis la comparaison entre une structure classique de chaîne de traction et une structure IBIS innovante, à performances automobiles identiques. Ainsi en termes de résultats, cette étude a montré que l'architecture IBIS en tirant profit de l'augmentation de la tension de phase et de la qualité des ondes de courant, permet de réduire le volume ainsi que les pertes totales de la machine, tout en gardant les mêmes performances à la roue. Le gain de volume observé a été de l'ordre de 17%, avec une répercussion positive pour l'architecture IBIS de 13% sur les pertes induites dans la machine.

À l'avenir, la modélisation des phénomènes électriques et magnétiques pourra être accompagnée par des modélisations mécaniques, acoustiques et thermiques de la chaîne de traction. L'intérêt sera de pouvoir continuer de comparer les deux architectures sur l'ensemble des physiques intervenant dans le dimensionnement des composants. Aussi, l'algorithme de calcul des pertes dans la machine et celui d'optimisation pourront être améliorés afin de gagner en temps de calcul.

7. 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'Énergie (ADEME) grâce au programme d'Investissement d'Avenir (PIA).

8. REFERENCES

- [1] K. Berger, L. Queval, A. Kameni, L. Alloui, et B. Ramdane, « Benchmark on the 3D Numerical Modeling of a Superconducting Bulk », 2016.
- [2] I. I. Mazali *et al.*, « Review of the Methods to Optimize Power Flow in Electric Vehicle Powertrains for Efficiency and Driving Performance »,

- Applied Sciences*, vol. 12, n° 3, p. 1735, févr. 2022, doi: 10.3390/app12031735.
- [3] G. Krebs, E. de Cecco, et C. Marchand, « Design approach of an axial flux motor for electrical powertrain vehicle », *XXth International Conference on Electrical Machines*, 2012.
- [4] I. Aghabali, J. Bauman, P. J. Kollmeyer, Y. Wang, B. Bilgin, et A. Emadi, « 800-V Electric Vehicle Powertrains: Review and Analysis of Benefits, Challenges, and Future Trends », *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, vol. 7, n° 3, p. 927- 948, sept. 2021, doi: 10.1109/TTE.2020.3044938.
- [5] C. Jung, « Power Up with 800-V Systems: The benefits of upgrading voltage power for battery-electric passenger vehicles », *IEEE Electrific. Mag.*, vol. 5, n° 1, p. 53- 58, mars 2017, doi: 10.1109/MELE.2016.2644560.
- [6] F. Roy, « IBIS (Intelligent Battery Integrated System) ». ADEME, PSA GROUPE, 2019. [En ligne]. Disponible sur: bibliothèque.ademe.fr/mobilite-et-transport/683-ibisintelligent-battery-integrated-system.html
- [7] CEA, « Battery having a brick architecture including cells arranged in series or in parallel », EP2735038 (B1), 2021
- [8] C. Mayet, D. Labrousse, A. Ditttrick, B. Revol, R. Bkekri, et F. Roy, « Simulation and Control of a New Integrated Battery System for Automotive Applications », in *PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2021, p. 1- 6.
- [9] H. Ben Ahmed *et al.*, « Electric Traction Chain with Segmented Power Supply », in *2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe)*, Ghent, Belgium: IEEE, sept. 2021, p. 1- 10. doi: 10.23919/EPE21ECCEEurope50061.2021.9570594.
- [10] A. Dianov et A. Anuchin, « Design of Constraints for Seeking Maximum Torque per Ampere Techniques in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Control », *Mathematics*, vol. 9, n° 21, p. 2785, nov. 2021, doi: 10.3390/math9212785.
- [11] S.-H. Kim, *Electric motor control: DC, AC and BLDC motors*. Cambridge, Massachusetts: Elsevier, 2017.
- [12] A. Kaloun, S. Brisset, M. Ogier, M. Ahmed, et R. Vincent, « Comparison of Cycle Reduction and Model Reduction Strategies for the Design Optimization of Hybrid Powertrains on Driving Cycles », *Energies*, vol. 14, n° 4, p. 948, févr. 2021, doi: 10.3390/en14040948.
- [13] J. M. André, S. Lacour, M. Hugot, Z. Olah, et R. Journaud, « Impact of the gearshift strategy on emission measurements - Artemis 3142 report », LTE 0307, mars 2003.
- [14] J. F. Cardoso, C. Chillet, L. Gerbaud, et L. A. Belhaj, « Electrical Machine Design by optimization for E-motor Application: a Drive Cycle Approach », in *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Gothenburg, Sweden: IEEE, août 2020, p. 2514- 2519. doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270888.
- [15] D. G. Holmes et T. A. Lipo, *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2003.
- [16] A. Hebala, S. Nuzzo, P. H. Connor, G. Volpe, C. Gerada, et M. Galea, « Analysis and Mitigation of AC Losses in High Performance Propulsion Motors », *Machines*, vol. 10, n° 9, p. 780, sept. 2022, doi: 10.3390/machines10090780.
- [17] T. Henneron, S. Clenet, J. Cros, et P. Viarouge, « Evaluation of 3-D Finite Element Method to Study and Design a Soft Magnetic Composite Machine », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, n° 2, Art. n° 2, mars 2004, doi: 10.1109/TMAG.2004.825180.
- [18] Y. Le Menach, S. Clenet, et F. Piriou, « Determination and utilization of the source field in 3D magnetostatic problems », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, n° 5, p. 2509- 2512, sept. 1998, doi: 10.1109/20.717578.
- [19] A. Krings et J. Soulard, « Overview and Comparison of Iron Loss Models for Electrical Machines », *Journal of Electrical Engineering*, vol. 10, p. 162- 169, mai 2010.
- [20] A. Moses, « Effects of magnetic properties and geometry on flux harmonics and losses in 3-phase, 5-limb, split-limb, transformer cores », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 23, n° 5, p. 3780- 3782, sept. 1987, doi: 10.1109/TMAG.1987.1065545.
- [21] X. Wan, Y. Li, J. Li, C. Liu, et J. Zhu, « Orthogonal decomposition of core loss along rolling and transverse directions of non-grain oriented silicon steels », *AIP Advances*, vol. 7, n° 5, p. 056651, mai 2017, doi: 10.1063/1.4976000.
- [22] W. Yan, H. Chen, Y. Liu, et C. Chan, « Iron loss and temperature analysis of switched reluctance motor for electric vehicles », *IET Electric Power Applications*, vol. 14, n° 11, p. 2119- 2127, nov. 2020, doi: 10.1049/iet-epa.2020.0166.

- [23] A. Moses et G. Shirkoohi, « Iron loss in non-oriented electrical steels under distorted flux conditions », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 23, n° 5, p. 3217- 3220, sept. 1987, doi: 10.1109/TMAG.1987.1065248.
- [24] H. Zhao, C. Ragusa, O. de la Barriere, M. Khan, C. Appino, et 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 Trans. Magn.*, vol. 53, n° 11, p. 1- 4, nov. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2701299.
- [25] M. Al Eit, P. Dular, F. Bouillault, C. Marchand, et G. Krebs, « Perturbation Finite Element Method for Efficient Copper Losses Calculation in Switched Reluctance Machines », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, n° 6, Art. n° 6, juin 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2655339.
- [26] M. Farzam Far, F. Martin, A. Belahcen, L. Montier, et T. Henneron, « Orthogonal Interpolation Method for Order Reduction of a Synchronous Machine Model », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, n° 2, p. 1- 6, févr. 2018, doi: 10.1109/TMAG.2017.2768328.
- [27] J. Dréo, A. Pétrowski, et P. Siarry, *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile: [recuit simulé, recherche avec tabous, algorithmes évolutionnaires et algorithmes génétiques, colonies de fourmis...]*, 3e tirage 2011. Paris: Eyrolles, 2011.
- [28] C. T. Kelley, *Iterative Methods for Optimization*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999. doi: 10.1137/1.9781611970920.