

Sujet de thèse entrant dans le cadre des demandes d'allocations régionales 2020

Moteur électrique à ultra-haute puissances massique et volumique

Directeurs de thèse : Jean-Philippe LECOINTE
Co-directeur : Stéphane DUCHESNE

RESUME DU SUJET DE THESE

Le travail de recherche proposé vise à concevoir une machine électrique à puissances massique et volumique très élevées. Le contexte applicatif visé porte sur la motorisation de véhicules électriques de sport automobile. Les exigences en termes de performances conduiront les chercheurs impliqués à mettre en œuvre des solutions en rupture avec les motorisations usuellement développées. Le contexte économique ne se limite pas au sport automobile ; les solutions déployées pourront trouver des dérivées dans les applications de mobilité électrique à des échelles diverses.

Le projet s'articulera autour de trois axes :

- premièrement, concevoir une machine qui vise une puissance massique permanente correspondant aux puissances maximales actuellement affichées par les équipementiers automobile ;
- deuxièmement, quantifier le rendement et les performances avec un système de refroidissement optimisé et un système d'isolation électrique supportant des températures au-delà des limites usuelles en régime intermittent et permanent ;
- troisièmement, intégrer dans la topologie de la machine la contrainte de la compacité pour une intégration aisée pour une application donnée. Dans ce cadre, un véhicule de sport automobile constituera un bon support.

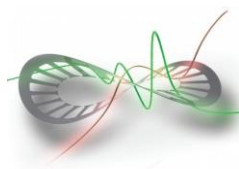
Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre le CRIT M2A et le LSEE. Ce projet qui s'appuie sur le positionnement du CRITM2A vers les motorisations électriques et sur l'expertise du LSEE pour la conception de machines électriques en rupture constitue le socle du rapprochement.

DESCRIPTIF DU SUJET

1) Sujet de recherche | Contexte scientifique et économique :

La conception de moteurs électriques efficaces fait actuellement l'objet de recherches dans de nombreux laboratoires. Ces travaux ont connus un essor notoire dans les années 2000 avec les labels d'efficacité de l'ADEME et le programme « motor challenge ». Les comités de normes ont ensuite pris la mesure de l'importance qu'il fallait donner à l'efficacité énergétique des moteurs électriques, ces derniers consommant près de 70% de l'énergie électrique de l'industrie. Ces chiffres sont en constante progression et les standards aujourd'hui imposés aux constructeurs de moteurs électriques ont permis de gagner de précieux points de rendement.

Paradoxalement, l'accroissement des rendements des machines industrielles ne s'est pas accompagné d'une réduction de leurs masses, au contraire. Ainsi, à puissance donnée et pour des critères fonctionnels identiques (indice de protection, tension d'alimentation), une machine à haut rendement IE4 (classe défini par la norme EN/CEI 60034-30) est environ 30% plus lourde et plus volumineuse qu'une machine des années 2000 qualifiée IE2. Cette évolution s'explique par la volonté de réduire les pertes dans les circuits magnétiques et dans les bobinages. Pour ce faire, les constructeurs ont revu à la baisse l'induction dans l'entrefer des machines d'une part et, d'autre part, les densités de courants dans les bobinages. Cette utilisation beaucoup plus conservatrice du circuit magnétique conduit inévitablement à l'accroissement de sa taille et donc de son poids pour une puissance donnée.



Un autre défi se pose avec le développement de la mobilité électrique : l'autonomie. Cette dernière est évidemment tributaire de la capacité des systèmes de stockage. Néanmoins, leur masse embarquée dépend de l'efficacité de la chaîne de traction complète mais également de sa masse et, indirectement, de son volume. Il est aujourd'hui évident que transporter moins de masse permet d'accroître l'autonomie à capacité de stockage donnée ou de réduire la masse d'élément de stockage à autonomie donnée. Un bon exemple est le moteur développé pour le *Green Taxiing* des avions, moteur qui doit être le plus léger et le plus compact possible afin de ne pas alourdir le train d'atterrissage de l'avion avec une masse qui devient inerte une fois l'aéronef en vol.

Cette évolution des rendements doit donc, pour les applications de mobilité, s'accompagner d'une réduction significative de la masse et du volume des machines électriques embarquées sans dégrader l'efficacité de la machine. Le travail de recherche proposé vise donc à concevoir une machine électrique à puissances massique et volumique très élevées. Le contexte applicatif visé porte sur la motorisation de véhicules électriques de sport automobile. Les exigences en termes de performances conduiront les chercheurs impliqués à mettre en œuvre des solutions en rupture avec les motorisations usuellement développées. Le contexte économique ne se limite pas au sport automobile ; les solutions déployées pourront trouver des dérivées dans les applications de mobilité électrique à des échelles diverses. L'allégement des masses embarquées trouve un écho auprès des constructeurs de véhicules de série développant leur gamme de véhicules hybrides ou électriques ; la recherche de puissance massique très élevée constituera un attrait indéniable pour les équipementiers de l'aéronautique, comme du ferroviaire pour des applications aux échelles nationales ou urbaines.

2) Etat du sujet dans le laboratoire d'accueil :

Les chercheurs du LSEE travaillent de concert sur les machines électriques en rupture depuis plus de 10 ans, avec des originalités portant sur deux points clé : le circuit magnétique d'une part et le système d'isolation électrique d'autre part.

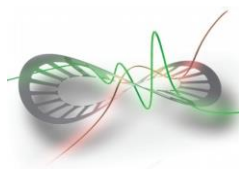
Premièrement, les travaux menés à partir de 2007 sur l'intégration d'aciers électriques à grains orientés à haute performance, produits par l'entreprise thyssenkrupp Electrical Steel (tkES) à Isbergues (62), ont trouvé une continuité temporelle, débouchant sur des partenariats nationaux. Par exemple, le démarrage en 2019 d'une thèse avec l'ITE VEDECOM (Versailles) sur la conception d'une machine électrique à circuit magnétique très performant montre l'expertise qu'a pu acquérir le LSEE quant à l'utilisation des tôles à grains orientés. Cette spécificité s'appuie sur trois axes :

- primo, la caractérisation au LSEE de l'acier à grains orientés sur une large gamme de températures est reconnue nationalement avec des thèses sur le sujet [ABABSA] et des contrats avec le CEA ou SAFRAN ;
- deusio, la compréhension du comportement de l'acier conduit les chercheurs à développer des méthodes de modélisation. Une thèse tripartite entre le LSEE, tkES et le GRUCAD¹, amorcée en 2019, concrétise le dynamisme du laboratoire sur le sujet ;
- tertio, le LSEE a été pionnier pour l'utilisation d'aciers électriques GO pour des machines tournantes, dès 2007 dans des machines asynchrones [LOPEZ] [BREVET] [MALLARD] ou des machines à reluctance variable à double saillance [AYDOUN] en 2018. Elle se poursuit aujourd'hui avec VEDECOM.

Deuxièmement, les travaux sur le système d'isolation électrique des machines permet au LSEE d'afficher une expertise double expertise :

- premièrement sur la conception de bobinages les mieux adaptés aux contraintes électriques imposées par le convertisseur électronique de puissance avec, par exemple, l'ordonnancement optimal des conducteurs dans les encoches [MONECLAIEY, TOUDJI] ;
- deuxièmement, l'utilisation de fils isolés en totale rupture avec les médias usuellement a permis au laboratoire de proposer des solutions de tenue à la température. Ainsi, la possibilité de faire fonctionner des machines à des températures dépassant celles imposées par les isolations classiques organiques ouvre la porte à des densités de courants dans les conducteurs plus importantes et, donc, à des densités de puissance plus importantes [COZONAC, LAIDOUDI, ZOUZOU].

¹ Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos, Université Fédérale de Santa Catarina (Brésil)



3) Objectifs visés et résultats escomptés

L'objectif majeur portera sur la conception d'une machine à ultra-hautes puissances massique et volumique, puissances correspondant à des applications en milieu automobile à haute performances.

Le projet visera à des résultats s'articulant autour de trois axes :

- Proposer une machine qui affiche une puissance massique permanente correspondant aux puissances maximales actuellement affichées par les équipementiers. Qualitativement, il s'agira d'atteindre une puissance massique permanente de 8kW/kg, carcasse incluse mais hors organe de refroidissement ;
- Deuxièmement, le système de refroidissement et la tenue à la température du bobinage permettront d'envisager des puissances maximales en régime intermittent plus élevées ; ces performances seront à quantifier, au même titre que le rendement ;
- Troisièmement, la topologie de la machine devra offrir une compacité facilitant une intégration aisée pour une application donnée. Un véhicule de sport automobile constituera un bon support.

4) Programme de travail

Le programme de travail s'articule autour des points suivants :

- T0 + 4 mois : Analyse bibliographique pour l'identification des topologies des machines à fortes puissances massiques / Identification des conducteurs isolés
- T0 + 6 mois : Définition de la topologie du moteur
- T0 + 8 mois : Prise en main du logiciel de simulation numérique pour le dimensionnement électromagnétique
- T0 + 14 mois : Dimensionnement électromagnétique et couplage avec un outil de simulation thermique
- T0 + 20 mois : Analyse du comportement mécanique
- T0 + 26 mois : Tâches parallélisées :
 - > Réalisation du prototype
 - > Rédaction d'un article de revue de rang A
 - > Rédaction de la partie théorique du manuscrit
 - > Recherche du convertisseur électronique de puissance et définition de lois de commande élémentaires
- T0 + 30 mois : Tests du prototype sur banc
- T0 + 36 mois : Rédaction du manuscrit et d'un article de revue de rang A

5) Collaborations prévues

Les collaborations associées à ce projet s'étendent à des niveaux régionaux et nationaux.

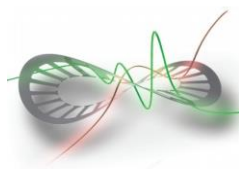
Premièrement, ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre le CRIT M2A² et le LSEE. Cette collaboration naissante s'explique triplement.

- D'abord, le CRIT M2A est situé à quelques kilomètres du LSEE ; la proximité favorise les échanges.
- Ensuite, les activités du CRIT ont évolué avec un positionnement vers la mobilité électrique. Le rapprochement des deux entités permet d'ainsi d'afficher des compétences fortes en génie électrique, particulièrement sur la chaîne de traction électrique, sur le territoire de la CABBALR³. Un tel projet constituera une vitrine valorisable par le CRITTM2A, le LSEE et la CABBALR. Cette mutualisation des forces et des compétences s'inscrit notamment au cœur de la labellisation « territoire d'industrie ». Conduire ce projet de thèse conjointement constituera la matérialisation de la volonté de faire rayonner, tant au niveau régional que national, le territoire ;
- De par leurs activités respectives, le CRIT et le LSEE travaillent à des niveaux TRL complémentaires : plutôt bas pour les LSEE et généralement supérieurs à 5 pour le CRIT.

Deuxièmement, si le démonstrateur porte sur la conception d'une machine électrique, le projet pourra s'intégrer dans le cadre d'une collaboration plus large, avec des acteurs industriels et académiques, en vue de dimensionner une chaîne de traction électrique complète.

² Centre de Recherche, d'Innovation Technique et Technologique en Moteurs et Acoustique Automobile

³ Communauté d'Agglomérations Béthune Bruay Artois Lys Romane



6) Liste de 10 publications portant directement sur le sujet

- [ABABSA] M. L. Ababsa, O. Ninet, G. Velu and J. P. Lecointe, "High-Temperature Magnetic Characterization Using an Adapted Epstein Frame," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 6, pp. 1-6, June 2018,
- [LOPEZ] S. Lopez, B. Cassoret, J. F. Brudny, L. Lefebvre and J. N. Vincent, "Grain Oriented Steel Assembly Characterization for the Development of High Efficiency AC Rotating Electrical Machines," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 10, pp. 4161-4164, Oct. 2009.
- [BREVET] Jean Francois Brudny, Regis Lemaitre, Jean-Noel Vincent, "Magnetic core and use of magnetic core for electrical machines," US Patent, US20110260574, 2011.
- [MALLARD] V. Mallard, G. Parent, C. Demian, J. Brudny and A. Delamotte, "Increasing the Energy Efficiency of Induction Machines by the Use of Grain-Oriented Magnetic Materials and Die Casting Copper Squirrel Cage in the Rotor," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 2, pp. 1280-1289, March-April 2019.
- [AYDOUN] R. Aydoun, G. Parent, M. Tounzi, J-Ph. Lecointe and K. Komez, "Comparison of 8/6 radial and axial flux switched reluctance machines", COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 38 No. 6, 2019, pp. 1756-1769.
- [MOENECLAEY] Méthode de conception des bobinages des actionneurs électriques adaptés aux nouvelles contraintes de l'avionique. MOENECLAEY Julien. Thèse de doctorat. Univ. Artois. 2014.
- [TOUDJI] M. Toudji, G. Parent, S. Duchesne, and P. Dular, "Determination of winding lumped parameter equivalent circuit by means of finite element method", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, 06-2017.
- [COZONAC] D. Cozonac, J-Ph. Lecointe, S. Duchesne and G. Velu, "Materials characterization and geometry of a high temperature induction machine," 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, 2014, pp. 2499-2505.
- [LAIDOUDI] A. Laidoudi, S. Duchesne, M. Mgaizar, N. Takorabet, "Increase the power-to-weight ratio of induction machines by increasing their operating temperature", International Symposium on Electromagnetic Fields, 2019, Nancy.
- [ZOUZOU] Nada ZOUZOU, Thu Thuy DANG, Stéphane DUCHESNE, Gabriel VÉLU and Olivier NINET, "Modeling and experimental characterization of nickel-plated copper wires for the design of extremely high temperature electrical machines," IEEE Trans. Magn., 2019.