

ReluMotion - Conception d'une chaîne de conversion électrique sans terres rares pour véhicules légers intermédiaires

Romain Delpoux¹, Thomas Huguet², Samir Ahmad Mussa^{3,4} et Stéphane Ngo Bui Hung³, Loïc Queval³

¹ Laboratoire Ampère UMR5005, INSA Lyon, Villeurbanne, France, romain.delpoux@insa-lyon.fr

² LAPLACE, Univ Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France thomas.huguet@toulouse-inp.fr

³ GeePs, CentraleSupélec, University of Paris-Saclay, Paris, France, loic.queval@centralesupelec.fr

⁴ INEP, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil

RESUME – Cet article présente les premiers résultats du projet ReluMotion : la conception d'une chaîne de conversion électrique sans terres rares pour des véhicules légers intermédiaires, en portant une attention particulière à la faisabilité d'un moteur sans terres rares, afin de réduire l'impact environnemental et la dépendance aux matériaux critiques. La chaîne de conversion se compose d'un moteur à réluctance variable à flux axial, de l'électronique de puissance associée et de la loi de commande dédiée. Le projet vise à terme à co-optimiser l'ensemble de la chaîne. La démarche adoptée s'inscrit dans une volonté forte d'utilisation de logiciels libre et de diffusion ouverte des résultats, favorisant ainsi le partage des connaissances et l'accélération de l'innovation dans le domaine de l'électromobilité.

Mots-clés – Moteur à réluctance variable, conception, commande, open source.

1. INTRODUCTION

L'Union Européenne vise l'utilisation de véhicules 100% électriques d'ici 2035. À ce jour, les moteurs synchrones à aimants permanents (PMSM) sont considérés comme les principaux candidats pour les applications de mobilité électrique en raison de leurs performances élevées. Cependant, l'impact environnemental des matériaux à base de terres rares et les risques associés à l'approvisionnement influencent significativement leur coût. Le développement de chaînes de traction utilisant des moteurs sans terres rares est une priorité stratégique à laquelle le projet ReluMotion souhaite contribuer. On s'intéresse plus particulièrement aux Véhicules Légers Intermédiaires (Véli), un concept en plein essor en France, soutenu par le projet Ademe eXtrême Défi Mobilité (<https://xd.ademe.fr>). Dans ce contexte, nous explorons la possibilité de remplacer le moteur à aimants permanents utilisé dans le projet open source Vhélío (<https://vhelio.org>) par un moteur-roue sans terres rares. Cette configuration permet potentiellement d'équiper une ou plusieurs roues du Vhélío selon la puissance requise.

L'un des principaux enjeux des moteurs pour la mobilité électrique est leur puissance massique (watt par kg). Pour les moteurs synchrones classiques, l'augmentation de la puissance massique passe par une augmentation de la densité du flux magnétique, ce qui a conduit à concentrer les recherches sur les matériaux. Les moteurs à réluctance utilisent une approche différente, où seule la géométrie du moteur est utilisée pour créer une aimantation au rotor, évitant ainsi l'utilisation d'aimants permanents. Cependant, cette géométrie, lorsque l'on impose des tensions sinusoïdales, conduit à une ondulation du couple électromagnétique élevée. Une meilleure stratégie de commande du moteur doit permettre d'inhiber ces phénomènes.

La littérature scientifique sur les machines synchroréluctante, bien qu'ils présentent une puissance spécifique inférieure à celle



Figure 1. Le projet Vhélío

des moteurs synchrones à aimants permanents, ils constituent un bon choix pour éliminer les aimants des chaînes de traction [1], [2], et [3]. Des travaux récents ont également montré que les moteurs à réluctance sont particulièrement adaptés aux voitures citadines légères [5]. En termes de commande, [1] identifie clairement la forte non-linéarité de ce type de moteur comme un enjeu scientifique, nécessitant des algorithmes de commande complexes pour obtenir les meilleures performances et réduire les ondulations de couple. Ces problématiques sont documentées dans des revues de littérature récentes, notamment [6] pour la production de couple maximal. Cependant, ces techniques restent largement des extensions de celles développées pour les moteurs synchrones à aimants permanents classiques et n'explorent pas suffisamment les méthodes modernes d'optimisation.

Afin de pallier la problématique de la puissance massique réduite des moteurs à réluctance variable, nos recherches ambitionnent la co-optimisation d'un moteur synchronreluctant à flux axial, de l'électronique de puissance associée et de la loi de commande dédiée. Cet article propose une première solution, où chaque composant est dimensionné séparément, servant ainsi de référence à une conception conjointe et optimisée ultérieure. Notons que dans un esprit de diffusion libre, les résultats actualisés du projet ReluMotion sont accessibles publiquement sur le dépôt GIT [Relumotion](#).

L'article est structuré comme suit. La section 2 décrit le cahier des charges que nous nous sommes fixés pour motoriser un Vhélio. La section 3 présente les choix retenus pour la conception du moteur, ainsi que le premier prototype réalisé. La section 4 expose le schéma de principe de l'onduleur, ainsi que le circuit imprimé (PCB) correspondant. La section 5 décrit brièvement le principe de la commande proposée. Enfin, la section 6 discute des premiers résultats obtenus pour la chaîne de conversion.

2. CAHIER DES CHARGES

Pour être considéré comme un vélo, la puissance maximale doit être inférieure ou égale à 250 W, et l'assistance électrique doit se couper au-delà de 25 km/h. Ce type de vélo est généralement alimenté par une batterie de 36 V. En supposant un facteur de puissance $\cos \phi = 0,6$, et une commande vectorielle du moteur pilotée par une modulation vectorielle via un onduleur triphasé à deux niveaux, les valeurs maximales suivantes sont obtenues : une tension RMS de phase $V_{RMS} = 14,7$ V et un courant RMS de phase $I_{RMS} = 9,34$ A. L'objectif de la conception conjointe présentée dans ce travail est de maximiser le couple développé par ce moteur et minimiser la masse, tout en respectant les contraintes décrites précédemment.

3. CONCEPTION DU MOTEUR

Nous introduisons ici une première version de la machine, simple à réaliser, servant de référence pour les optimisations futures. Les choix technologiques qui en découlent conduisent à une machine synchronreluctante à flux axial, avec un rotor constitué de plots rectangulaires et un stator à bobinage concentré avec une seule phase par encoche. Les parties ferromagnétiques ont été usinées dans de l'acier standard bas carbone de type XC10.

Une première version de la machine a été dimensionnée pour produire un couple de 0.5 N.m et ce afin de limiter la taille de ce premier prototype. Ce dimensionnement a été réalisé en utilisant un modèle réluctant. La topologie choisie est un moteur triphasé à 4 paires de pôles (8 plots au rotors) et 12 encoches au stator. Le dimensionnement a été validé par simulation éléments finis à l'aide du logiciel gratuit FEMM. Les éléments constituant la machine du premier prototype sont représentés sur la figure 2.

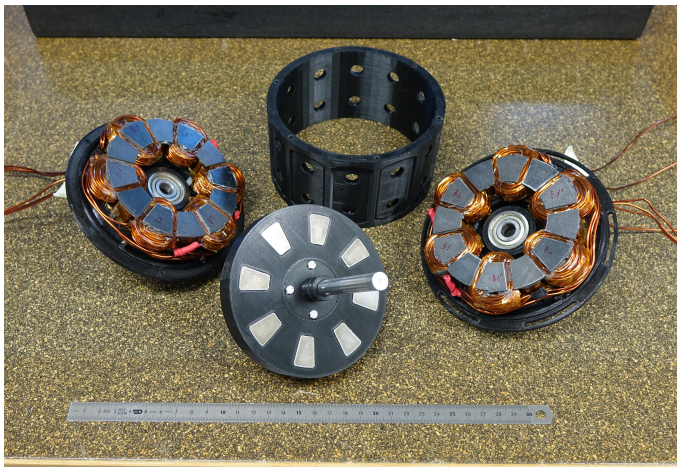


Figure 2. Premier prototype de la machine

4. CONCEPTION DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

Le schéma de principe de l'onduleur est présenté sur la figure 3. Un onduleur à deux niveaux est utilisé, composé de 6 MOSFETs silicium capables de supporter une tension de 36 V et un courant maximal de 14 A par phase. Les drivers sont intégrés directement sur la carte de l'onduleur. Dans un premier temps, les drivers sont isolés du contrôleur par fibres optiques. Pour piloter le moteur en commande vectorielle, au moins deux mesures de courant de phase sont nécessaires, réalisées à l'aide de résistances shunt. La tension du bus DC, qui dépendant de l'état de charge de la batterie, doit également être mesurée afin d'adapter la tension maximale dans l'algorithme de commande. Enfin, afin de pouvoir évaluer l'efficacité, une mesure du courant continu est ajoutée.

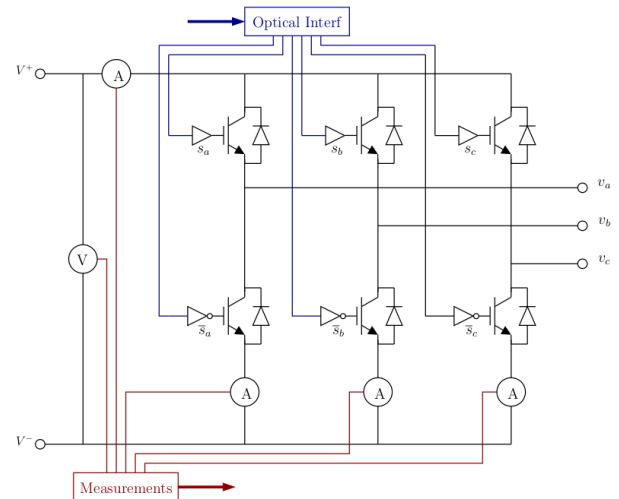


Figure 3. Schéma de principe de l'onduleur

Dans un but de diffusion, le PCB est réalisé à l'aide de logiciel open source KiCad. Le PCB réalisé pour cette application est représenté sur la figure 4.

5. SYNTHÈSE DE LA LOI DE COMMANDE

La loi de commande développée pour cette application utilise les cartographies de flux en fonction des courants obtenues par éléments finis. Cela permet de mettre en œuvre une commande de flux comme décrite dans l'article [8] et de calculer les trajectoires MTPA (Maximum Torque Per Ampere) à appliquer au moteur à partir d'une demande de couple. Le schéma de principe de la commande est illustré sur la figure 5. Afin de mettre en œuvre la loi de commande sur une cible embarquée temps réel, à faible coût et proche de l'application finale visée, celle-ci est implantée expérimentalement sur un microcontrôleur de type dsPIC33AK128MC106 de la marque Microchip. Ce microcontrôleur, dédié à la commande moteur, est vendu à l'unité pour environ 2,40 €. Pour des raisons de simplicité de mise en œuvre, la loi de commande est compilée et programmée sur la puce à l'aide du générateur de code automatique de Matlab/Simulink. Cet outil n'est pas libre, mais les fichiers Matlab/Simulink utilisés pour générer le code sont mis à disposition de la communauté sur le Git.

6. RÉSULTATS

6.1. Validation expérimentale

La chaîne de conversion a été assemblée et testée. Sur la figure 6 on voit (i) au centre en noir : la machine synchronreluctante à flux axial conçu pour cette étude, (ii) en bas à droite : l'onduleur triphasé conçu pour cette étude, (iii) en bas à gauche : le microcontrôleur programmé avec la loi de commande conçu pour cette étude. Ce banc de test fonctionne de manière sat-

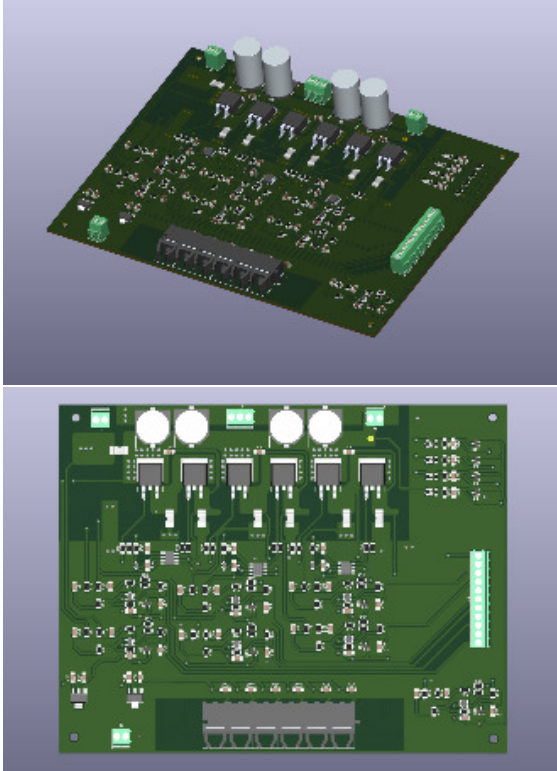


Figure 4. PCB de l'onduleur réalisé sur KiCad

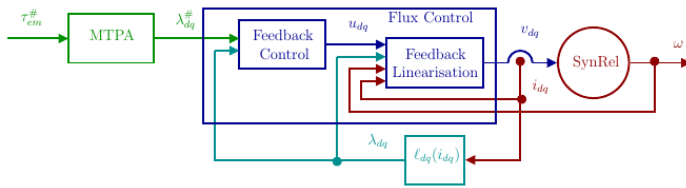


Figure 5. Schéma de commande MTPA du moteur à réluctance variable

isfaisante. En raison d'un dysfonctionnement des capteurs de courants embarqués sur la carte, l'asservissement de courant pour les comparaisons avec la théorie a été réalisée avec des sondes de courant externe, connectées au microcontrôleur.

Les performances de la machine synchronoréluctante à flux axial ont pu être mesurées à l'aide d'un couple-mètre et d'un frein hystérésis. Les résultats expérimentaux sont comparés aux simulations FEMM. Ces dernières ont été faites deux fois : une première fois avec les grandeurs théoriques obtenues lors du prédimensionnement. Une seconde fois avec les grandeurs mesurées sur le prototype réel. Il y a deux différences entre ces deux simulations. Premièrement, le prédimensionnement a été fait pour un entrefer de 1 mm entre le rotor et chacun des deux stators contre 1.25 mm pour le prototype. En effet, les difficultés rencontrées lors du montage du prototype ne nous ont pas permis d'atteindre l'entrefer visé. Ces difficultés seront corrigées lors de la conception d'un deuxième prototype. La seconde différence le prédimensionnement et le prototype concerne le matériau ferromagnétique. Les propriétés magnétiques (courbe B-H) de l'acier XC10 ont été prises dans la bibliothèque matériaux de FEMM pour les simulations de prédimensionnement alors qu'elles ont été mesurées sur le matériau réel pour les simulations prototype. Ces dernières sont comparées sur la figure 7. On peut voir sur cette figure que les propriétés du matériau réel sont bien en dessous des propriétés attendues. Ce constat entraînera un changement de matériau pour une deuxième version de ce prototype.

Les résultats sont présentées sur la figure 8 et sur la fig-

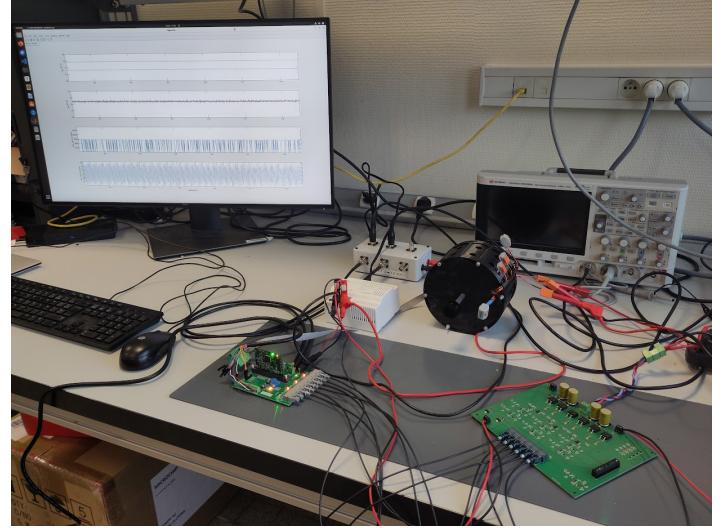


Figure 6. Photo du banc de test expérimental.

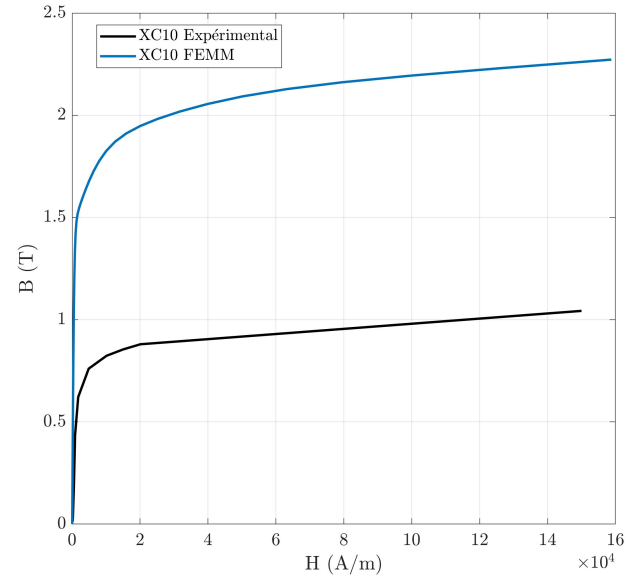


Figure 7. Comparaison des propriétés magnétiques de l'acier bas carbone XC10.

ure 9. Sur ces figures est représenté le couple en fonction de l'amplitude du courant d'alimentation pour un angle de calage électrique de 45° et le couple en fonction de l'angle de calage électrique pour une amplitude de courant d'alimentation de 10A.

Voici plusieurs remarques sur ces figures. (i) Les résultats FEMM sont proches des résultats expérimentaux ce qui tend à valider le modèle FEMM. (ii) Il y a une grande différence entre le modèle de prédimensionnement et le modèle prototype. Cette différence s'explique par la différence d'entrefer entre prédimensionnement et prototype (de 1 mm à 1.25 mm) à cause de problèmes de montages et par la différence entre le matériau ferromagnétique théorique et le matériau réel. Ces deux différences seront ajustées lors de la conception du prochain prototype.

6.2. Caractère reproductible

Un aspect qui nous semble important à souligner concernant les résultats de ce projet est la reproductibilité du prototype. Dans cette optique, nous avons veillé à ce que tous les fichiers nécessaires soient disponibles sur le dépôt GIT [ReluMotion](#), or-

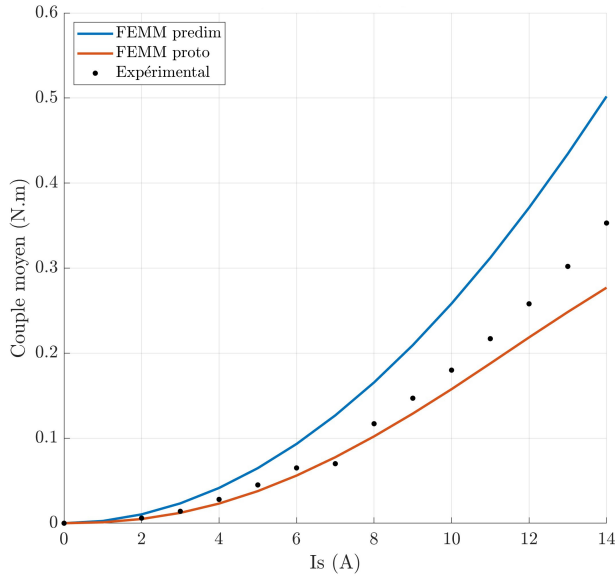


Figure 8. Couple en fonction de l'amplitude du courant d'alimentation pour un angle de calage électrique de 45° .

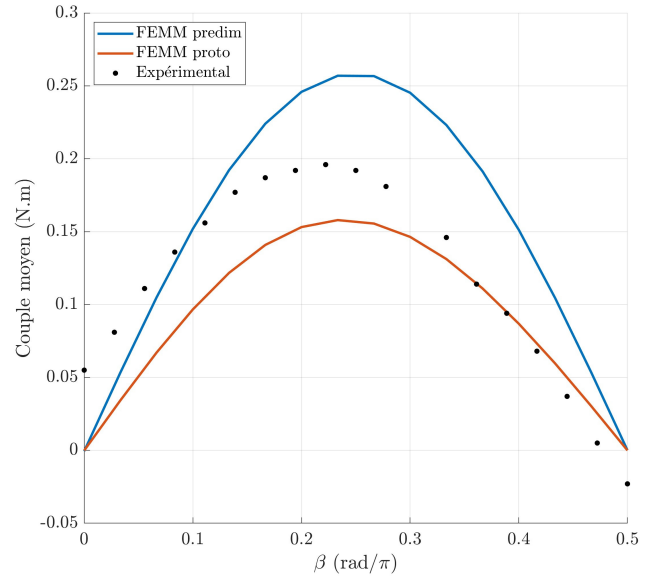


Figure 9. Couple en fonction de l'angle de calage électrique pour une amplitude de courant d'alimentation de 10A.

ganisé en trois dossiers dédiés respectivement à la conception de la machine, à la conception de l'onduleur, et à la commande.

Concernant la conception du moteur, un fichier Excel de prédimensionnement est fourni. Il a permis de réaliser les premiers calculs analytiques de la machine, avant une validation par éléments finis à l'aide du logiciel FEMM. Le fichier `machine_Relumotion.mat` permet quant à lui de simuler la machine à l'aide de l'outil développé par l'équipe GREM3 du laboratoire Laplace : [machine_modeling](#). Enfin, tous les fichiers CAO nécessaires à la réalisation mécanique de la machine sont également accessibles.

Pour permettre la reproduction du circuit imprimé, nous mettons à disposition le projet KiCad de la carte électronique. Le logiciel KiCad permet, via une extension, de générer automatiquement les fichiers JLCPCB pour la production du circuit imprimé. Ces fichiers incluent notamment la nomenclature (BOM — Bill of Materials) et le fichier de positionnement des composants. Le fichier généré est également fourni et permet de commander directement le circuit imprimé via le site de JLCPCB.

Concernant la partie commande, la loi de commande repose sur les travaux proposés sur le site [ctrl+elec](#), qui utilise Matlab/Simulink pour la génération automatique du code à compiler sur le microcontrôleur. Ainsi, le dépôt contient les fichiers Matlab/Simulink nécessaires pour tester la loi de commande proposée. Afin de pallier les difficultés liées aux licences Matlab/Simulink, le code C généré est également disponible. Il permet de programmer directement le microcontrôleur à l'aide du logiciel MPLAB, qui ne nécessite pas de licence.

Enfin, nous sommes conscients que la documentation constitue un élément essentiel dans le partage de projets libres. C'est pourquoi nous avons développé un Wiki associé au dépôt GIT. Une des perspectives du projet est l'enrichissement de cette documentation.

7. CONCLUSIONS

Cet article présente la conception d'une chaîne de conversion composées d'un moteur sans terres rares, de son électronique de puissance et de sa commande, en mettant l'accent sur l'utilisation d'outils libres. Une première version de la chaîne de conversion, dimensionnée pour une puissance réduite, a été réalisée. Elle servira de référence pour une co-optimisation future. Ce travail ouvre la voie vers des solutions de motorisation

durables et accessibles, contribuant ainsi aux objectifs de transition énergétique et de mobilité plus verte.

8. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le GDR SEEDS du CNRS pour le soutien financier qui a contribué à la réalisation de ces travaux.

Les auteurs remercient également David Charalampous, pour l'association Vélo Solaire Pour Tous (VSPT), pour les divers échanges sur le projet Vhélio.

9. RÉFÉRENCES

- [1] J. Islam *et al.*, "Different traction motor topologies used in e-mobility. Part I: solutions without magnet", *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM 2020)*, pp. 131-137, Gothenburg, Sweden, 2020.
- [2] J.R. Riba *et al.*, "Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 367-379, 2016.
- [3] B. Raghuraman *et al.*, "Sustainability aspects of electrical machines for e-mobility applications. Part I: a design with reduced rare-earth elements," *47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2021)*, pp. 1-6, Toronto, Canada, 2021.
- [4] Y. Wang *et al.*, "Comparative study of non-rare-earth and rare-earth PM motors for EV applications," *Energies*, vol. 15, no. 8, p. 2711, 2022.
- [5] M. Credo *et al.*, "Adoption of the synchronous reluctance motor in electric vehicles: a focus on the flux weakening capability," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 1, pp. 805-818, 2022.
- [6] F. Tinazzi *et al.*, "Classification and review of MTPA algorithms for synchronous reluctance and interior permanent magnet motor drives," *21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, Genova, Italy, 2019.
- [7] N. Bianchi *et al.*, "A review about flux-weakening operating limits and control techniques for synchronous motor drives," *Energies*, vol. 15, no. 5, p. 1930, 2022.
- [8] R. Delpoux *et al.*, "Finite element dq-model for MTPA flux control of synchronous reluctance motor (SynRM)," *IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 1-6, Helsinki, Finland, 2023.