

# **Contrôle D'une Structure De Traction/Recharge Pour Véhicule Electrique Hybride**

Monsieur **Saeid AGHAEI HASHJIN** présente un manuscrit de thèse rédigé en langue anglaise, intitulé « *Control of a Traction/Charging Structure for Hybrid Electric Vehicle* ». Ce travail préparé au laboratoire GREEN, à l'Université de Lorraine, a été dirigé par M. Babak NAHID-MOBARAKEH, professeur à l'Université de Lorraine, et codirigé par M. El-Hadj MILIANI, enseignant-chercheur à l'IFP School, école d'ingénieurs dépendant de l'IFP Energies Nouvelles. Le manuscrit est rédigé de façon claire et concise, il fait état de quatre chapitres détaillés de longueur sensiblement équilibrée.

L'électrification des moyens de transport est considérée comme l'une des solutions pertinentes pour réduire les émissions des gaz à effet de serre. En effet, les nouvelles normes européennes imposent des limites de plus en plus restrictives sur les émissions de CO<sub>2</sub> par km. Ceci est un enjeu industriel important pour les constructeurs d'automobiles. Par conséquent, ces derniers s'orientent vers les véhicules hybrides et électriques dans lesquels une chaîne de traction électrique est présente. Celle-ci est constituée d'une machine électrique, alimentée par un convertisseur statique d'électronique de puissance connecté à une source d'énergie électrique et des éléments de stockage. Depuis plus de deux décennies, différentes topologies ont été étudiées pour la traction électrique et plusieurs solutions ont été commercialisées. Ces produits sont de plus en plus légers, fiables et efficaces tout en respectant les contraintes des constructeurs d'automobile sur les coûts.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire concernent de façon générale la simplification hardware et software des chaînes de traction des véhicules électriques et hybrides, favorisant l'intégration des systèmes électriques embarqués, tout en réduisant les

coûts. Cette perspective d'optimisation technico-économique est pleinement en accord avec les problématiques actuelles des marchés des véhicules électriques qui consistent à disposer de solutions intégrées et à coûts maîtrisés pour l'électromobilité. L'objectif principal de ce travail de thèse consiste à développer un contrôleur fiable et robuste pour les systèmes de motorisation et d'entraînement à courant alternatif, utilisés dans les véhicules électriques et hybrides électriques, de telle sorte que le contrôleur puisse fonctionner avec un nombre minimum de capteurs et soit indépendant du modèle d'état du système contrôlé. Étant donné qu'une chaîne de propulsion à courant alternatif se compose de différentes briques électromécaniques interconnectées : d'une machine à courant alternatif de traction et de convertisseurs de puissance d'interface, le contrôle de chaque partie doit être considéré séparément. L'effort de réduction global du nombre de capteurs par l'industrie automobile, devenue ces dernières années de plus en plus compétitive, est de proposer un moyen d'optimiser les coûts pour rester compétitive sur les marchés. Ainsi la réduction du nombre de capteurs électroniques, en particulier les capteurs de courant de phase de la machine à courant alternatif, est une solution pour réduire les coûts de fabrication et de maintenance.

Le premier chapitre en grande partie basé sur la littérature scientifique montre d'une part que la stratégie de contrôle mécanique sans capteur est maintenant davantage étudiée et développée pour ces applications d'entraînement électrique des véhicules. D'autre part, comme mentionné par l'auteur, la tendance de l'électrification des véhicules va vers l'utilisation de machines à basse tension et à courant élevé qui nécessitent cependant des capteurs de courant coûteux. Le système « i-StARS » conçu par Valeo est par exemple prévu pour être utilisé dans des applications dites « mild-hybrid ». De cette façon, le contrôle sans capteur de courant peut également être considéré comme un bon candidat pour réduire les coûts liés à la suppression de plusieurs capteurs de courant dans le groupe motopropulseur. Malgré le développement de la stratégie de contrôle mécanique sans capteur, l'approche actuelle de contrôle sans capteur n'est

pas aussi largement étudiée dans la littérature. Ainsi, la méthode de contrôle sans capteur de courant basée sur l'observation est une approche récemment proposée par le Dr. Adrien Corne dans sa thèse de doctorat préparée au laboratoire GREEN et soutenue en décembre 2019. Selon cette approche, un observateur d'état non linéaire est utilisé pour estimer les grandeurs issues des capteurs de courant non mesurés. Ensuite, les variables estimées sont injectées dans une boucle de contrôle. Cette approche de contrôle, et les défis qui y sont liés, sont rapportés et étudiés dans le chapitre 1. Enfin, dans la dernière section du chapitre, les technologies de contrôle orienté/basé sur les données, en particulier le contrôle adaptatif sans modèle (MFAC), sont proposées comme solution pour fixer les limites des méthodes de contrôle sans capteur basées sur l'observation.

Le chapitre 2, au contenu théorique et exhaustif, présente une description des théories de contrôle basées sur les données, en particulier la méthode de contrôle adaptatif sans modèle MFAC, est largement détaillée théoriquement. Afin d'explicitier la théorie du MFAC, une nouvelle approche de linéarisation dynamique pour les systèmes non linéaires à temps discret est tout d'abord présentée en détail. Le modèle du système est transformé en un modèle de données linéarisé, qui est une matrice pseudo-gradiente (notée PG) aux paramètres inconnus. Ensuite, les éléments de la matrice PG sont estimés à chaque pas d'échantillonnage en utilisant les données d'entrée/sortie mesurées du système contrôlé. Dans ce cas, trois types de modèles de données basés sur la linéarisation dynamique : la forme compacte (CF), la forme partielle (PF) et la forme complète de linéarisation dynamique (FFDL), sont respectivement présentés pour les systèmes non linéaires à entrée unique et sortie unique (SISO), à entrées multiples et sortie unique (MISO) et à entrées multiples et sorties multiples (MIMO). Ensuite, sur la base de ces approches de linéarisation dynamique, trois types d'algorithmes basés MFAC : 1) CFDL-MFAC, 2) PFDL-MFAC et 3) FFDL-MFAC, sont respectivement étudiés et comparés pour les systèmes non linéaires à temps discret SISO et MIMO. D'après les résultats obtenus par

l'auteur, si l'on compare les trois stratégies de contrôle adaptatif sans modèle, le CFDL-MFAC est le plus simple, qui est généralement utilisé pour les systèmes simples. D'autre part, les deux dernières méthodes sont des cas particuliers qui peuvent être utilisés pour contrôler des systèmes plus complexes en raison de leur degré de liberté plus ajustable et de leur plus grande souplesse de conception par l'introduction d'un plus grand nombre de paramètres pour le modèle de données linéarisées. A ce stade l'auteur a détaillé entre les algorithmes PFDL-MFAC et FFDL-MFAC, et au vu de leur complexité, lequel est le plus précis et rapide, permettant un gain de temps pour le contrôle du système motopropulseur.

Dans le chapitre 3, qui est le cœur théorique et expérimental de la thèse, le système de motopropulsion étudié basé sur une machine synchrone à griffes à rotor bobiné de type WRSM est tout d'abord décrit en introduisant le modèle électromagnétique et électrique de la machine. Dans la deuxième partie du chapitre, le contrôle MFAC est développé pour le contrôle du courant du stator de la machine WRSM étudiée. Un autre contrôleur PI, plus classique, est également développé pour le comparer en termes de dynamique avec le MFAC. Plusieurs tests de simulation et expérimentaux ont été réalisés pour vérifier l'efficacité du MFAC pour le contrôle du système WRSM. En comparant les performances expérimentales du régulateur PI et du MFAC, l'auteur conclut à une performance efficace pour le MFAC, bien que les performances dynamiques des deux contrôleurs soient très proches. Dans la troisième partie de ce chapitre, un algorithme de contrôle du courant sans capteur, utilisant le MFAC, est développé pour le système WRSM en ne mesurant que la vitesse de rotation du rotor. Selon cette stratégie de contrôle, ni la mesure ni les observations des courants de phase ne sont utilisées dans le système de contrôle, ce qui simplifie grandement le système. Une autre théorie de contrôle sans capteur de courant basée sur l'observation, proposée par Adrien Corne dans sa thèse de doctorat, est également utilisée pour la comparer avec la technique MFAC. L'algorithme de contrôle proposé est tout d'abord testé en simulation selon plusieurs conditions de fonctionnement. Le

démarrage, le suivi (*tracking*), la variation des paramètres et la variation de charge sont pris en compte dans les tests. Les résultats de simulation obtenus présentent une performance efficace de l'algorithme de contrôle basé sur le MFAC. A noter cependant une erreur signalée sur l'axe (d) de Park du courant statorique dû à une variation notable des paramètres du système et du couple de charge. Plusieurs tests expérimentaux sont effectués par l'auteur pour analyser la performance et l'efficacité du contrôleur développé pour lequel les résultats obtenus ont de manière confiante validé la performance en simulation du MFAC. Par rapport à la méthode de contrôle basée sur l'observation, puisque le MFAC ne dépend pas d'un paramètre du système, sa performance *en tracking* est plus acceptable pendant une variation de la charge ou du point de fonctionnement. Comme, explique l'auteur, le MFAC n'a aucune action sur les courants de phase et ne contrôle que la vitesse du rotor, sa dynamique est relativement lente, et l'auteur explique que les courants nécessitent plus de temps pour converger vers les références souhaitées.

Le chapitre 4 présente l'étude du contrôle des convertisseurs de puissance, utilisés dans les systèmes d'entraînement électrique. Ici l'auteur focalise sur les topologies de convertisseur Boost DC/DC et DAB triphasé (dite *Dual Active Bridge*) qui est une topologie indirecte à nœud AC utilisant généralement un transformateur pour l'isolation galvanique et la montée en tension. L'auteur indique que les techniques de contrôle conventionnelles sont généralement limitées par l'absence d'un modèle précis du système contrôlé et nécessitent alors plusieurs capteurs et variables mesurées pour concevoir le contrôleur. L'étude réalisée présente le MFAC comme une alternative appropriée aux méthodes basées contrôle MBC conventionnelles en surmontant leurs limites. Dans la première section de ce chapitre, le MFAC a été développé et utilisé pour commander un convertisseur élévateur DC/DC de courant continu. De plus, un contrôleur classique PI a été également introduit pour être comparé au MFAC. Les résultats de la simulation et des expériences montrent que le MFAC est une méthode efficace pour contrôler

les convertisseurs DC-DC, car il ne nécessite que la mesure de la tension de sortie, ce qui est aisé et économique. Dans la deuxième partie de ce chapitre, un convertisseur DAB triphasé a été étudié par simulation uniquement. La structure de base et les principes de fonctionnement sont bien détaillés par l'auteur. Ensuite, le MFAC a été introduit pour contrôler le convertisseur DAB triphasé en ne mesurant que la tension de sortie du convertisseur. Les performances du MFAC développé ont été testées en simulation dans différentes conditions de fonctionnement. Les résultats de simulation obtenus présentent, là également, une bonne performance pour le MFAC dans le contrôle du convertisseur DAB triphasé.

Enfin, les perspectives futures issues de ce travail de thèse, sont présentés et discutés. L'auteur indique que plusieurs aspects peuvent être abordés pour approfondir les recherches sur le contrôle des systèmes de propulsion des véhicules électriques. En effet, l'auteur explique justement que la température de la chaîne de conversion peut être prise en compte dans le contrôle du système d'entraînement électrique, ce qui est un point fondamental en particulier selon les contraintes électrothermiques de fonctionnement et d'usage du véhicule, qui impactent sur l'électronique de puissance et toute la chaîne de motorisation. En effet, il existe déjà des capteurs de température intégrés dans les chaînes de traction. Cependant, ceux-ci génèrent, comme l'explique l'auteur, des coûts supplémentaires importants en raison de leurs fréquentes défaillances et de la nécessité de les remplacer à un coût élevé. Dans ce contexte, la modélisation thermique de tous les éléments constitutifs de la chaîne de traction deviendra nécessaire pour estimer la température des points critiques de la chaîne de conversion électromécanique. De plus l'auteur mentionne qu'il pourrait être intéressant de tester la solution proposée dans cette thèse à d'autres machines électriques que la WRSM par souci de généralisation. En effet, une solution similaire pourrait être testée pour une machine à aimants permanents PMSM, une machine à induction ou un moteur à réluctance variable qui sont tous potentiellement des candidats moteurs adaptés à une application des véhicules électriques ou

hybrides. Enfin, en ce qui concerne l'indépendance intrinsèque de la MFAC par rapport à toute information sur le modèle du système étudié, la méthode MFAC présentée pourrait être utilisée pour différentes applications afin d'améliorer la fiabilité du groupe motopropulseur électrique ou des briques électromécaniques qui composent la chaîne. En effet, la possibilité de passer d'un contrôleur classique basé modèle à un contrôleur sans modèle dans le cas d'un système non linéaire complexe pourrait bénéficier à la fiabilité de l'ensemble du système.