

Les enjeux du concept CTAF : Chaîne de Traction à Alimentation Fractionnée

Par ordre alphabétique : Hamid BEN AHMED², Olivier BETHOUX⁶, Antoine CIZERON^{1,5}, Emmanuel HOANG¹, Anthony JUTON⁴, Eric LABOURE⁵, Adrien MERCIER⁵, Eric MONMASSON³, Javier OJEDA¹, Loïc QUEVAL⁵, Ghislain REMY⁵

1 : SATIE, ENS Paris-Saclay - 2 : SATIE, ENS Rennes - 3 : SATIE, Université de Cergy Pontoise - 4 : ENS Paris-Saclay
5 : GeePs, Université Paris-Saclay - 6 : GeePs, Sorbonne Université

RESUME - Cet article présente le concept CTAF – Chaîne de Traction à Alimentation Fractionnée. Ce concept s'articule autour des machines polyphasées, dont les enroulements des phases sont fractionnés en sous-enroulements. Chaque sous-enroulement est alimenté par un convertisseur d'électronique de puissance basse tension indépendant. L'objet de cette publication est de décrire ce concept, d'en exposer les atouts, ainsi que les limites.

Mots-clés—*Chaîne de traction électrique intégrée, chaîne de traction basse tension, motorisation électrique, bobine fractionnée, alimentation fractionnée.*

1. INTRODUCTION

Les véhicules électriques émergent peu à peu chez chaque constructeur, et la production devrait être croissante compte tenu des réglementations liées à l'impact des gaz à effet de serre émis par les moteurs à explosion. Actuellement, un choix de motorisation semble faire consensus chez les différents constructeurs, à savoir le moteur synchrone à aimants permanents. Cependant, la structure de ce type de machine n'est pas encore standardisée. Par ailleurs, les niveaux de tensions au sein des véhicules diffèrent, s'adaptant souvent aux besoins de puissance. En effet, une première approche consiste à augmenter la tension plutôt que le courant lorsque que l'on souhaite augmenter la puissance, à l'image des réseaux électriques. Cependant, dès que l'on dépasse 48 volts, les normes de sécurité imposent des protections supplémentaires qui peuvent être difficiles à gérer et coûteuses. Ainsi, on peut voir apparaître des motorisations électriques « basse tension » chez certains constructeurs. Aux vues de ces différents choix technologiques, la conclusion à tirer est de multiplier les études prospectives afin d'affiner les connaissances sur les systèmes de traction.

Dans ce contexte, une Chaîne de Traction à Alimentation Fractionnée (CTAF) est proposée. Cette nouvelle structure [1] est présentée dans la section 3 et peut contribuer au développement des chaînes de traction intégrées. Ainsi, nous proposons dans la section 2, un état de l'art de ces dernières. Les avantages et inconvénients de cette architecture sont exposés dans la section 4. Enfin les verrous et difficultés scientifiques sur lesquels les auteurs souhaitent travailler sont décrits dans la section 5.

Les différentes natures des phénomènes physiques rencontrés impliquent la nécessité de maîtriser l'ensemble des domaines du génie électrique, voire plus, ce qui explique le nombre de contributeurs de ce projet. De plus, chacun de nous a développé « son » domaine de compétences en ayant la chance de se côtoyer depuis de nombreuses années. Des affinités « scientifiques » et humaines se sont réunies dans les réflexions autour de ce concept CTAF. Collectivement, nous avons décidé de « tout » mettre « à plat », avec bienveillance mais sans complaisance. La controverse scientifique et rien d'autre.

Nous présentons ce nouveau concept de chaîne de traction en ayant « débroussaillé » les idées avec nos moyens. Bien sûr de très nombreux travaux sont à mener. Nous espérons que cet article soit la clef qui permette d'ouvrir la porte de futures collaborations.

2. ETAT DE L'ART DES CHAINES DE TRACTION INTEGREES

Avant d'essayer de faire un état de l'art, inévitablement partiel, nous voudrions revenir, très simplement, sur la genèse de celle-ci. En une phrase, c'est la rencontre entre un « machiniste » qui cherchait une solution pour alimenter « sa » machine électrique (ME) à sa puissance convertible maximale [2] et un « électronicien de puissance » qui cherchait à intégrer au maximum « ses » convertisseurs à leurs environnements [3]. Cette invention fait intervenir deux grandes familles de questions :

- 1 - Comment modifier le couplage des enroulements d'une ME afin d'optimiser ses modes de fonctionnement ?
- 2 - En quoi le fractionnement des convertisseurs d'électronique de puissance (EnPu) est-il favorable ?

Le concept CTAF permet une grande intégration de l'EnPu avec la ME. Ainsi, dans cet état de l'art, nous reviendrons sur des travaux liés à ce thème (en anglais : IMD pour « *Integrated Motor Drives* »).

2.1. Reconfiguration des enroulements

Les « électrotechniciens » connaissent bien la technique du démarrage « étoile-triangle » pour une machine asynchrone alimentée par le réseau à fréquence fixe et à tension fixe, afin de réduire l'amplitude des courants au démarrage, ainsi que le câblage « Dahlander », afin de pouvoir disposer de deux vitesses de rotation. Avec l'arrivée de l'EnPu, des chercheurs ont proposé des solutions afin d'optimiser les modes de fonctionnement de la machine électrique. Nous pouvons citer [4], où les auteurs « *have proposed an ac spindle motor drive with a wide constant power range by switching the winding connections of the motor* ». Ils utilisent la même technique que celle utilisée pour les transformateurs à « changeur de prise » (*tap on each winding*) et peuvent ainsi changer le nombre de spires des bobinages de façon dynamique. Ensuite [5], où les auteurs proposent des solutions électroniques pour changer la configuration du bobinage et pour finir [6], où une modélisation de la reconfiguration dynamique des bobinages est proposée.

2.2. Fractionnement des convertisseurs d'EnPu

Dans [7], les auteurs « *present the findings of the first global analysis of energy consumption in electric motor driven systems (EMDS) and the options to reduce it* ». A la page 56 de ce document, les auteurs montrent l'intérêt d'un fonctionnement fractionné des convertisseurs. En complément à cette référence, nous pouvons citer [8] et [9] où les auteurs se sont intéressés aux

pertes dans les composants EnPu lors de fonctionnement en charge partielle (*partial load*).

2.3. Systèmes intégrés (EnPu et ME)

Dans la référence [10], datant de 2016, les auteurs présentent de façon très complète beaucoup de solutions. Il y a 203 références ! Ensuite la référence [11] issue du « *Fraunhofer institute for integrated systems and device technology* » et le projet EMiLE [12]. Le « *Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium* » n'est pas en reste et par exemple dans [13], démontre ses compétences en la matière. Ces projets d'intégration sont en développement [14] et sont un enjeu majeur [15] (voir plus particulièrement le « slide 7 »). Pour finir, dans [16], l'auteur propose des éléments complémentaires sur cette partie de l'état de l'art.

3. PRESENTATION DU CONCEPT CTAF

Le concept CTAF vise à concevoir une chaîne de traction incluant une machine « haute tension » capable de tourner à haute vitesse, mais alimentée par des sources « basse tension ». Pour réaliser cette équivalence, l'idée est de fractionner les bobinages des phases. Cette idée a fait l'objet de la publication d'un brevet [1].

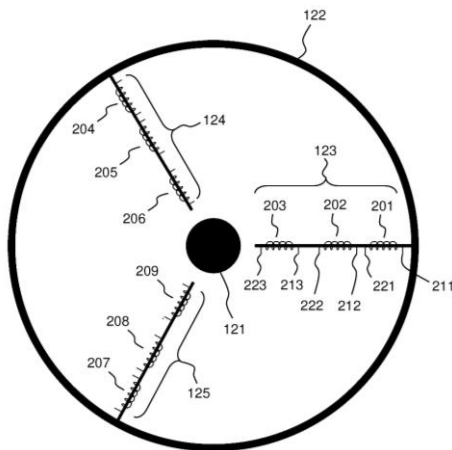


Fig. 1. Fractionnement des enroulements d'une machine polyphasée. Reproduction de la figure 2 du brevet [1].

Sur la figure 1, les enroulements numérotés 123, 124 et 125 représentent les trois phases d'une machine triphasée. Il est possible de fractionner ces enroulements en sous-enroulements. Par exemple, la bobine 124 est subdivisée en trois sous-bobines numérotées 204, 205, 206. De la sorte, on peut alimenter chaque sous-bobine par une tension faible (par exemple 48 volts), ce qui est équivalent magnétiquement à alimenter la bobine 124 par trois fois cette tension (par exemple 144 volts). D'un autre point de vue, on peut aussi remarquer que l'on applique les mêmes ampères-tours. Cette idée de fractionner les enroulements se retrouve dans des publications antérieures [4]. Le cas extrême correspond à celui où l'enroulement est fractionné en autant de sous-enroulements qu'il y a de spires. Dans ce cas, chaque spire (611, 612 et 613 sur la figure 2) pourrait être connectée directement sur un circuit imprimé (620, sur la figure 2).

L'idée originale présentée ici est de fractionner aussi l'alimentation de puissance. Chaque sous-bobine est associée à un convertisseur statique de puissance afin de l'alimenter indépendamment des autres. Ceci offre alors plusieurs degrés de liberté dans l'alimentation globale de la machine. En effet, plusieurs configurations sont possibles, dont une est présentée en figure 3.

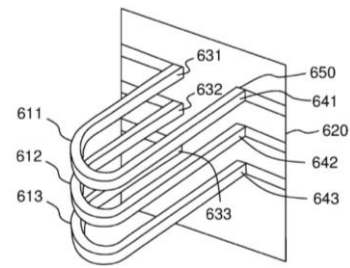


Fig. 2. Fixation des enroulements fractionnés jusqu'à la spire. Reproduction de la figure 6b du brevet [1].

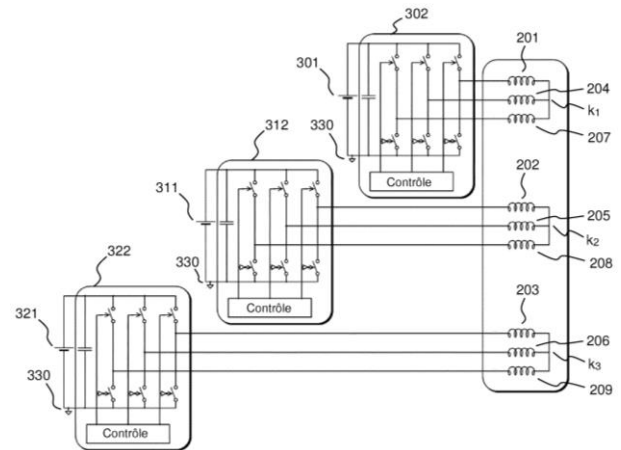


Fig. 3. Exemple d'alimentation des sous-bobines par une alimentation fractionnée triphasée. Reproduction de la figure 3.b du brevet [1].

4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU CONCEPT CTAF

4.1. Les principaux avantages

- **Taux de disponibilité amélioré** : L'adaptation de la machine électrique à la structure du convertisseur d'électronique de puissance conduit à une intégration adaptée et à une réponse optimisée au cahier des charges (coût, sûreté de fonctionnement, conditions d'utilisation, etc...).

De plus, la résilience est améliorée par le choix d'une architecture multi-convertisseurs. En effet, la gestion du mode dégradé paraît facilitée en fractionnant les enroulements. Que ce soit un sous-enroulement ou bien le convertisseur associé qui soit défaillant, deux stratégies sont envisageables : augmenter le courant des autres sous-enroulements de la même phase pour garder le même état magnétique ou passiver les sous-enroulements correspondants des autres phases.

- **Chaîne « basse tension »** : Par concept, le bus DC fonctionne à une tension réduite par rapport à la solution standard équivalente. Le bus DC peut être « basse tension » pour limiter les risques électriques, ou « moyenne tension » pour respecter le minimum de Paschen du champ disruptif. Du bus DC d'alimentation à la ME, tous les éléments sont en tension relative réduite même si le système peut être « basse tension » ou « haute tension ».

Les corollaires sont la possibilité d'utiliser des transistors qui ne nécessitent pas une grande tenue en tension d'une part, et une meilleure adéquation avec les batteries d'accumulateurs basse tension d'autre part.

- **Diminution des contraintes sur les isolants** : Les « dv/dt » sont mieux répartis sur chaque bobinage alimenté par un convertisseur, car ils comportent peu de spires. Ce phénomène est d'autant plus intéressant à prendre en compte que la technologie des interrupteurs est rapide (SiC, GaN). Cette meilleure répartition permet de retarder le vieillissement des isolants des bobinages. Le point de vue complémentaire est de conserver le même vieillissement, mais comme les tensions sont plus faibles, il devient possible de réduire le « grade » des isolants – au niveau des spires ou dans les fonds d'encoche.
- **Alimentation multi-sources** : Sur la figure 3 est représenté un exemple d'alimentation des sous-bobines par une alimentation fractionnée. Il est possible d'envisager l'utilisation d'une alimentation multi-sources DC (batterie d'accumulateurs, pile à combustible, supercondensateurs) avec des usages différenciés. Il est aussi possible de gérer les fonctions d'équilibrage (BMS) de chaque source DC par le convertisseur d'électronique de puissance associé.
- **Degrés de liberté supplémentaires de la commande** : Les degrés de libertés supplémentaires pourraient permettre l'optimisation dynamique du nombre de spires actives en fonction du point de fonctionnement (gestion des points de fonctionnement bas couple/haute vitesse, etc...) et l'auto-centrage (limitation de l'usure des paliers) par l'utilisation de certaines spires dédiées à une fonction de « centrage magnétique ».
- **Basse puissance par interrupteur** : Le fractionnement de la puissance par interrupteur est adapté à l'intégration (technologie CMS). De cette intégration et de cette réalisation industrielle d'un grand nombre de cartes pourrait découler une meilleure fiabilité grâce à des processus parfaitement maîtrisés. Notons toutefois que la multiplication des interrupteurs de petite puissance ne minore pas forcément la fiabilité !
- **Facteur de remplissage amélioré** : Une répartition plus homogène de la température est possible grâce à des meilleurs coefficients d'échange thermique induite par une amélioration du coefficient de remplissage et par un « design » thermique optimisé.

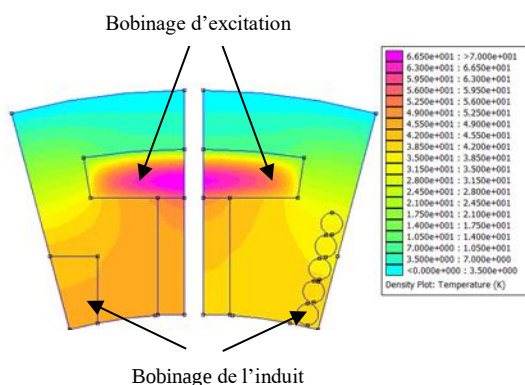


Fig. 4. Exemple de simulation thermique

Afin d'illustrer cela, nous avons effectué des simulations thermiques pour déterminer les échauffements des

enroulements pour deux types de réalisation, dans le cas d'un cahier des charges « motorisation de véhicule électrique » défini dans [21] et ceci pour une machine synchrone à commutation de flux à double excitation [22]. A l'issue d'un premier dimensionnement électromagnétique, nous avons pu déterminer que le nombre de spires est de l'ordre de 5.

La simulation présentée sur la figure 4 a été effectuée pour un point de fonctionnement (65 Nm ; 5400 tr/min) placé sur la courbe de puissance nominale (30 kW). Pour ce point de fonctionnement, la densité de courant du circuit d'excitation est de 12 A/mm² et celle de l'induit est de 8,6 A/mm².

Sur la gauche de la figure, nous avons des enroulements « classiques » pour l'induit et l'excitation, qui sont thermiquement modélisés par un ensemble homogène [23]. Alors que sur la droite de la figure, le bobinage de l'induit a été modifié et est constitué des 5 conducteurs directement « placés » dans le « fer » du circuit magnétique et isolés avec une feuille de mica d'une épaisseur de l'ordre de 0,15 mm. La répartition de température obtenue par la maîtrise du positionnement des conducteurs est plus homogène.

- **Compacité améliorée** : Un « System-level design » peut permettre d'obtenir de plus hautes densités de puissance. En effet, comme le souligne [17]: « *Focusing solely on the machine specific power can lead to a sub-optimal solution at the system-level.* »
- **Utilisation des « nouveaux » composants** : L'utilisation de composant SiC ou GaN pourrait permettre de faibles pertes, une température de fonctionnement plus élevée et un système de refroidissement mutualisable avec celui de la machine électrique.

Dans [16], l'auteur écrit :

« Utilisant des composants en Silicium, les anciennes générations de convertisseurs statiques n'étaient pas adaptées à cette intégration au sein des machines électriques. La température de fonctionnement d'un module de Silicium étant bien inférieure aux températures qui peuvent régner dans le boîtier d'une machine électrique, il était inconcevable de mutualiser les systèmes de refroidissement entre l'électronique de puissance et le moteur. Contrairement aux composants en Silicium, les nouvelles générations de composants basées sur des semi-conducteurs à grand gap peuvent tolérer des températures de fonctionnement supérieures à celle du Silicium. L'arrivée de cette nouvelle génération de composants a permis de reconsidérer une intégration profonde des convertisseurs statiques au sein des machines électriques.

Les semi-conducteurs dits « à grand gap » les plus utilisés en électronique de puissance sont le Nitrure de Gallium (GaN) et le Carbure de Silicium (SiC). La largeur de bande de ces matériaux est nettement supérieure à celle du Silicium (Si), ce qui leur confère, entre autres, une meilleure tenue en tension et permet un fonctionnement à plus haute température.

Pour une même fréquence de commutation les pertes par commutation apparaissant dans les composants SiC et

GaN sont nettement inférieures à celle du Si. Cet avantage permet de réduire la taille des échangeurs thermiques [18].

Ce constat permet d'envisager l'utilisation de fréquences de découpage élevées pour le contrôle de la machine. Cette possibilité présente plusieurs avantages comme la diminution de l'ondulation de couple, l'augmentation de la dynamique du système et la possibilité d'utiliser des fréquences fondamentales élevées compatibles avec les machines à hautes-vitesses ou à grand nombre de paires de pôles.

Cependant, l'effet de leur commutation rapide sur le vieillissement de la machine électrique associée doit également être pris en compte. »

4.2. Les principaux inconvénients

- **Grand nombre de capteurs** : La solution proposée repose *a priori* sur un nombre important de capteurs engendrant des problèmes de coût, de traitement temps réel d'information et de résilience. La gestion de la synchronisation est d'autant plus difficile que le fractionnement est important. Il est donc nécessaire qu'elle soit gérée par un contrôle-commande embarqué performant et aux entrées/sorties nombreuses, donc complexe à mettre au point et onéreux.
- **Difficulté de synchronisation** : On peut suspecter une fragilité/sensibilité du concept vis-à-vis de la qualité de synchronisation de la commande des interrupteurs pour le même bobinage. Ceci est lié à la faible inductance de fuite entre les bobinages situés sur les mêmes dents (et donc par nature parfaitement couplés magnétiquement).

La difficulté de synchronisation de l'ensemble des convertisseurs et l'équilibrage des courants dans les sous-enroulements peuvent nécessiter des rapports cycliques différents sur chaque onduleur pour réaliser cet équilibrage. Du fait du fort couplage magnétique entre les sous-bobines, si les convertisseurs sont désynchronisés ou appliquent des rapports cycliques différents pour contrer les disparités de chaque enroulement, des ondulations de courant limitées uniquement par les inductances de fuite du système apparaissent. Un compromis doit être établi entre le déséquilibre des évolutions « basse-fréquence » et l'augmentation des ondulations « haute-fréquence » des courants. Ce compromis guidera l'étude dans le choix de la structure à adopter pour le contrôle du système. Une première étude [19] complétée par [20] permet de mieux appréhender ces phénomènes.

- **Repenser entièrement la commande** : En lisant le paragraphe précédent on aura compris que le fractionnement des phases de la machine engendre des difficultés supplémentaires du point de vue de la commande. Ceci doit dans un premier temps nous obliger à établir un « bon » modèle dynamique de la machine en vue de sa commande. Nous entendons par là la prise en compte dudit fractionnement et des couplages magnétiques supplémentaires qu'il implique. Ceci conduira très probablement à la conception d'une commande hiérarchisée d'au moins 3 niveaux :

1. Une commande rapprochée qui devra gérer la synchronisation entre les ordres de commande envoyés à toutes les sous-machines élémentaires (voir paragraphe précédent).
2. Un étage de régulation « classique » de type commande vectorielle qui permettra de contrôler les courants de flux et de couple des sous-machines élémentaires actives (voir Fig. 3).
3. Un étage de supervision qui devra décider en temps réel quelles sont les sous-machines élémentaires actives et quelles sont les inactives (sachant que l'inaction côté commande ne signifie pas forcément que la sous-machine concernée est au repos, en effet elle pourrait éventuellement servir de capteur). On l'aura compris, cette supervision requiert un monitoring très précis de la machine de façon à proposer en temps réel un « dispatching » optimisé (tant en mode sain qu'en mode de défaut) des références de courant des sous-machines élémentaires [24].

Enfin, un mot sur l'implantation numérique envisagée : la structure hiérarchique de la commande et la diversité des tâches à réaliser semble propice à l'utilisation d'un composant de type SoC FPGA (System-on-Chip Field Programmable Gate Array). En effet, ce type de composant intègre à la fois des cœurs processeurs ARM très performants (1 GHz) qui sont adaptés à des traitements complexes (on pense ici au superviseur) et une fabrique FPGA parfaitement adaptée à la commande bas niveau effectuée en parallèle des sous-machines élémentaires [24].

- **Connectique complexe** : Multiplier le fractionnement revient à multiplier les connectiques, donc le risque de défaillance. Des solutions technologiques non standards pourraient être étudiées en vue de réduire le coût et d'augmenter la fiabilité.
- **Compatibilité électromagnétique** : Un coefficient de remplissage des enroulements plus élevé améliore les échanges thermiques mais induit une augmentation de la capacité parasite de mode commun : la CEM est donc à surveiller tout particulièrement.
- **Isolation de la cellule en défaut** : Pour pouvoir profiter de la continuité de fonctionnement, il est impératif de garantir que toutes les défaillances conduisent à un état isolable. Si une association convertisseur sous-enroulements vient à présenter une défaillance, la continuité de service (assurée par la déconnection du convertisseur défaillant) repose sur la capacité à garantir le défaut des interrupteurs en circuit ouvert et non pas en court-circuit.
- **Ressource critique en cuivre** : Par concept, la chaîne est à fort courant et donc consommatrice de cuivre, qui est une ressource critique (même si on peut espérer un recyclage aisé du bobinage).
- **Difficulté de recyclage** : Un système intégré présente un recyclage plus difficile en fin de vie.

5. PROTOTYPE EXPERIMENTAL

Un prototype de machine dont les enroulements statoriques ont été divisés en trois a été réalisé. Un onduleur 9-phases alimente les trois sous-systèmes triphasés résultants. L'asservissement des courants se fait au travers des ampères-tours traversant les encoches c'est-à-dire la somme des contributions des trois sous-systèmes.

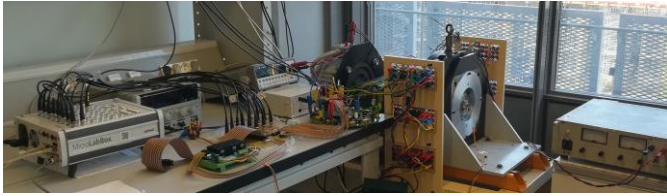


Fig. 5. Banc d'essai validant l'alimentation des trois subdivisions du prototype au travers d'un onduleur 9-phases.

Actuellement, le banc d'essai représenté dans la figure 5, est composé d'un variateur 9-phases comportant trois onduleurs triphasés dont les bus DC peuvent être découplés. Ce variateur d'une puissance de 1kW est dimensionné pour une tension de bus de 48Vdc et un calibre en courant pour les phases de 10A crête. À titre de comparaison, la solution classique avec un seul onduleur triphasé nécessiterait une tension de bus DC de 144V pour le même calibre en courant.

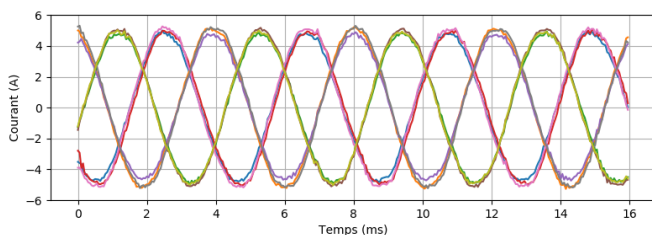


Fig. 6. Mesures des neuf courants dans la structure pour une commande globale de 5A crête par phase.

6. VEROUS ET DIFFICULTES SCIENTIFIQUES

Les premières analyses permettent de lister les verrous et difficultés scientifiques sur lesquels il est souhaitable de travailler afin de pouvoir développer cette technologie.

Comme tout système physique, il est nécessaire d'établir des modèles pour pouvoir estimer ses performances et le piloter. Chaque élément de la chaîne de traction doit être modélisé suffisamment finement pour obtenir un modèle optimisé de l'ensemble de la chaîne. L'objectif suivant est de développer le logiciel du contrôle-commande embarqué permettant d'assurer les meilleures performances (couple, vitesse, rendement, bruit, CEM...) en mode sain comme en mode dégradé.

Le nombre de degrés de liberté induit par le fractionnement est à explorer. Chaque sous-enroulement n'est pas nécessairement alimenté, notamment lorsque la pleine puissance n'est pas requise. Il devient alors possible d'utiliser ces sous-bobines comme des capteurs pour faire du diagnostic en temps réel. Cependant, il faut prévoir une gestion supplémentaire de ce qui s'apparente à une fonction auxiliaire.

Comme le nombre de connectiques et de capteurs va croissant avec le fractionnement, une réflexion est à mener sur l'impact des différents capteurs de cette structure complexe. Une étude de sensibilité permettrait de savoir quels sont les capteurs indispensables au bon fonctionnement, et quels sont ceux dont on peut s'affranchir afin de s'approcher au mieux des commandes « *sensorless* ».

7. CONCLUSIONS

Cet article présente un nouveau concept pour une Chaîne de Traction à Alimentation Fractionnée. Après un état de l'art sur les chaînes de traction intégrées et les systèmes de reconfiguration des enroulements de la ME avec l'EnPu, nous avons décrit l'invention puis nous avons listé les principaux avantages et inconvénients. Nous avons ainsi défini un ensemble de thèmes de recherche associés au concept CTAF :

- Elaboration de modèles
- Contrôle superviseur du système en mode sain
- Contrôle superviseur du système en mode défaillant
- Contrôle rapproché du système
- Co-optimisation de l'ensemble convertisseur-machine : architecture, contrôle, dimensionnement
- Analyse des degrés de liberté offerts pour des fonctions auxiliaires
- Eco-conception de la chaîne
- Impact de la qualité des capteurs et conception de capteurs

8. REFERENCES

- [1] E. Hoang, E. Labouré, « Machine électrique alimentée en basse tension et chaîne de traction multicellulaire associée », brevet N° : FR3063190, <https://bases-brevets.inpi.fr/fr/document/FR3063190.html>, 2018.
- [2] E. Hoang, B. Gaussens, M. Lécivain, M. Gabsi, "Proposition pour accroître la puissance convertible par un ensemble onduleur de tension – machine synchrone à commutation de flux à double excitation dans une application motorisation de véhicule hybride ou électrique," Symposium de génie électrique (SGE'14) , 8-10 juillet 2014, ENS Cachan.
- [3] F. Forest, T. A. Meynard, E. Labouré, B. Gelis, J. Huselstein and J. C. Brandelero, "An Isolated Multicell Intercell Transformer Converter for Applications With a High Step-Up Ratio," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 3, pp. 1107-1119, March 2013. doi: 10.1109/TPEL.2012.2209679.
- [4] Kume, Tsuneo, et al. "A wide constant power range vector-controlled ac motor drive using winding changeover technique." IEEE Transactions on Industry Applications 27.5 (1991): 934-939
- [5] T. Gerrits, C.G.E. Wijnands, J.J.H. Paulides, and J.L. Duarte. "Electrical Gearbox Equivalent by means of Dynamic Machine Operation," 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 2011.
- [6] M. Boxriker, P. Winzer, J. Kolb, M. Doppelbauer. "Increasing the operating range of permanent magnet synchronous motors by switching the winding configurations". IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2016.
- [7] P. Waide and C. U. Brunner. "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems". Working paper, International Energy Agency, 2011. <https://www.iea.org>
- [8] A. P. Pai, T. Reiter, O. Vodyakho, I. Yoo, M. Maerz. "A Calorimetric Method for Measuring Power Losses in Power Semiconductor Modules". 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017.
- [9] F. Chang, O. Ilina, O. Hegazi, L. Voss, M. Lienkamp. "Adopting MOSFET Multilevel Inverters to Improve the Partial Load Efficiency of Electric Vehicles". 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017.
- [10] R. Abebe, G. Vakil, G. Lo Calzo, T. Cox, S. Lambert, M. Johnson, C. Gerada, B. Mecrow. "Integrated motor drives: state of the art and future trends". IET Electric Power Applications, vol. 10, no. 8-9, 2016.
- [11] M. März, A. Schletz, B. Eckardt, S. Egelkraut, H. Rauh. "Power Electronics System Integration for Electric and Hybrid Vehicles". 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, 2010.
- [12] https://www.iisb.fraunhofer.de/content/dam/iisb2014/en/Documents/Research-Areas/vehicle_electronics/FraunhoferIISB_ProductSheet_FE_EMILE_1_V3_WWW.pdf
- [13] N. R. Brown, T. M. Jahns, R. D. Lorenz, "Power Converter Design for an Integrated Modular Motor Drive". IEEE Industry Applications Annual Meeting, 2007.

- [14] J. Wang, Y. Li, Y.-H. Han, "Integrated Modular Motor Drive Design With GaN Power FETs," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 51, no. 4, pp 3198-3207, july/august 2015.
- [15] https://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/edt000_boyd_2015_o.pdf
- [16] A. Cizeron, "Intégration des chaînes de conversion électrique », *revue 3EI*, n°100, 2020.
- [17] A. M. El-Refaie, M. Osama, "High Specific Power Electrical Machines: A System Perspective", 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017.
- [18] E. Gulpinar and A. Castellazzi, "Single-Phase T-Type Inverter Performance Benchmark Using Si IGBTs, SiC MOSFETs, and GaN HEMTs," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 10, pp. 7148-7160, Oct. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2506400.
- [19] A. Cizeron, J. Ojeda, E. Labouré, O. Béthoux, "Prediction of PWM-induced current ripple in subdivided stator windings using admittance analysis," *Energies*, vol.12, pp. 4418, 2019
<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/23/4418>.
- [20] A. Cizeron, J. Ojeda, O. Bethoux, "Modélisation d'enroulements statoriques subdivisés pour l'évaluation d'une commande équilibrante," *Symposium de génie électrique 2020*, Nantes.
- [21] J. D. McFarland, T.M. Jahns, A. M. El-Refaie, "Performance and Efficiency Comparisons for Interior PM and Flux-Switching PM Machines with Ferrite Magnets for Automotive Traction Applications". *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015.
- [22] E. Hoang, M. Lecrivain, and M. Gabsi, "A new structure of a switching flux synchronous polyphased machine with hybrid excitation," *Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, pp. 1–8, Sep. 2007.
- [23] L. Idoughi, X. Mininger, F. Bouillault, L. Bernard, and E. Hoang, "Thermal model with winding homogenization and FIT discretization for Stator Slot," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 47, no. 12, december 2011.
- [24] E. Monmasson, L. Idkhajine and M. W. Naouar, "FPGA-based Controllers," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 14-26, March 2011