

Perspectives d'intégration pour la chaîne de conversion d'énergie des véhicules électriques

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Antoine CIZERON

Édité le
25/05/2020

école
normale
supérieure
paris-saclay

Cette ressource est issue d'une publication du numéro 100 de La Revue 3EI d'avril 2020. Antoine Cizeron est Doctorant au Laboratoire de Génie Électrique et Électronique de Paris (GeePs).

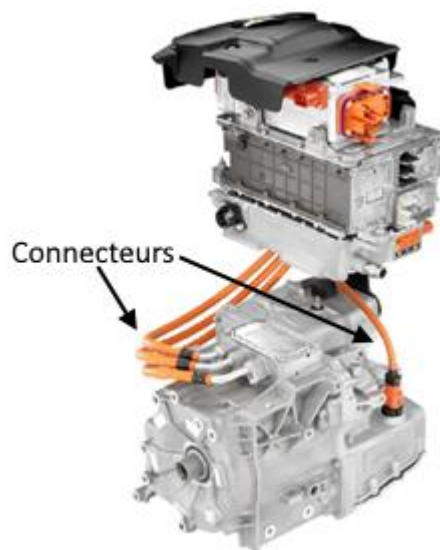
Cette ressource s'intéresse à l'intégration de l'électronique de puissance au sein des machines électriques. Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'une intégration globale de toute la « chaîne de traction » convertissant l'énergie électrochimique de la batterie en énergie mécanique finale nécessaire aux roues d'un véhicule électrifié (VE ou VEH). Les axes de recherche et de développement permettant de répondre aux exigences spécifiques de l'application automobile seront envisagés. La première partie expose les ordres de grandeurs de densité de puissance attendus dans le cadre des chaînes de conversion intégrées. Le point central pour atteindre ces objectifs ambitieux consiste à pousser la logique d'intégration de l'électronique de puissance au plus près des machines électriques, quitte à revoir les topologies actuelles de ces deux constituants voire l'architecture globale. La seconde partie se focalise sur les solutions actuelles d'intégration de puissance fondées sur la technologie silicium qui est la plus fiable à ce jour et sur l'accélération du vieillissement de la machine qui peut être induit par sa proximité avec l'électronique de puissance. La voie du fractionnement est ensuite présentée comme étant un moyen d'améliorer la résilience du système en ajoutant de la redondance et en diminuant les contraintes sur la machine. La dernière partie se focalise sur les enjeux de l'utilisation des composants à large bande interdite dans une telle application et sur les verrous technologiques qu'il reste à lever pour rendre cette technologie compatible avec la sensibilité des machines électriques aux commutations rapides et avec les exigences du contexte automobile.

1 – Introduction

Les chaînes de conversion électrique sont largement utilisées dans tous les domaines industriels pour assurer des tâches nécessitant une vitesse variable : pompage, traction, etc. Dans une chaîne de conversion électrique traditionnelle, l'électronique de puissance et la machine électrique sont conçues séparément pour être ensuite assemblées électriquement par des connectiques adaptées. Si cette méthode peut engendrer un système complet sous-optimal, elle présente deux avantages. Le premier intérêt est la possibilité de constituer un dispositif industriel en se fondant sur des constituants déjà conçus, fiabilisés et amortis (assemblage de composants sur étagère). Le second réside dans la possibilité de découpler la gestion thermique de chaque constituant : chacun opère autour de son point de fonctionnement optimal vis-à-vis de son compromis spécifique : durée de vie versus compacité. D'ores et déjà, ces chaînes de conversion se généralisent dans le contexte applicatif singulier de la traction automobile en pleine électrification. Dans le domaine des transports, la masse est un déterminant majeur de la consommation finale. De plus, les différents éléments doivent être facilement logeables afin de garantir la meilleure habitabilité. Les exigences en termes de densité massique et volumique sont donc très élevées. Dans l'automobile s'ajoute une contrainte extrêmement forte de coût. Ces contraintes sont telles que des solutions de convertisseurs intégrés aux machines électriques sont désormais envisagées ; ce type de solution permet de s'affranchir des connectiques et de mutualiser les systèmes de refroidissement. Cela

amène donc à concevoir de manière conjointe les dispositifs de conversion électrique et de conversion électromécanique en visant, pour la réalisation globale, les objectifs suivants :

- Augmentation des densités de puissance ;
- Réduction des perturbations électromagnétiques ;
- Réduction des coûts ;
- Maîtrise des procédés de fabrication et de validation.



2012 Electric Drive System

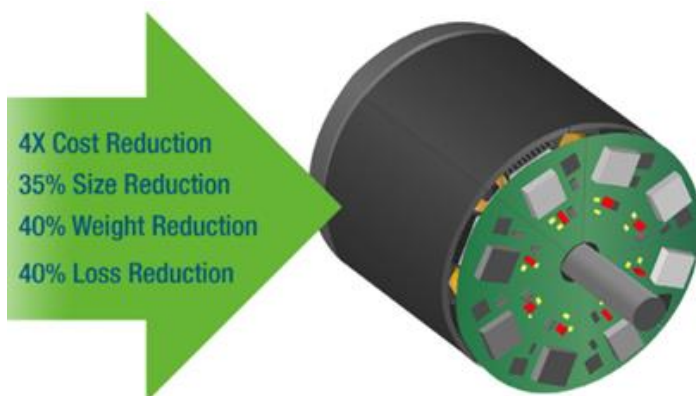
\$30/kW, 1.1 kW/kg, 2.6 kW/L
90% system efficiency

55kW SYSTEM COST OF \$1650

Today's electric drive systems use discrete components, silicon semiconductors, and rare earth motor magnets.

Figure 1 : Chaîne de conversion centralisée, source [1]

Depuis plusieurs années, certaines institutions publiques comme le département américain dédié à l'énergie (US DoE) affichent des ambitions claires et chiffrées quant au coût et aux densités de puissance visés. La Figure 1 montre un système centralisé de conversion électromécanique pour lequel les fonctions d'alimentation et de conversion électromécanique sont assurées par des sous-systèmes logés dans des carters distincts et éloignés ; le fonctionnement de l'ensemble est assuré par des connecteurs de puissance et de signal.



2022 Electric Drive System

\$8/kW, 1.4 kW/kg, 4.0 kW/L
94% system efficiency

55kW SYSTEM COST OF \$440

Future systems may meet these performance targets through advancements such as fully integrating motors and electronics, wide bandgap semiconductors, and non-rare earth motors.

Figure 2 : Chaîne de conversion intégrée, source [1]

Au début des années 2010, de tels systèmes pouvaient atteindre une densité volumique de 2,6 kW/L. L'un des inconvénients de cette structure centralisée est que les câbles employés pour relier l'électronique de puissance au moteur électrique entraînent des surtensions aux bornes des enroulements de la machine [2]. Afin de limiter le rayonnement des perturbations électromagnétiques, ces connectiques doivent être blindées, ce qui les rend massives et onéreuses. À l'inverse, l'intégration de l'électronique de puissance au plus près de la machine entraîne la mutualisation du système de refroidissement et la réduction drastique de la longueur des connectiques. Les pièces métalliques de la machine peuvent également servir de blindage et permettre de confiner les perturbations électromagnétiques. Cependant, cette proximité peut

avoir des effets néfastes aussi bien sur l'électronique de puissance que sur la machine électrique. Par exemple, les connectiques et les convertisseurs statiques doivent être conçus de manière à supporter de forts niveaux de vibrations et de contraintes mécaniques. De même, le vieillissement de la machine sous l'effet de la proximité des convertisseurs statiques doit également être évalué, d'autant plus qu'ils commutent rapidement. Cet aspect sera détaillé au cours de la partie suivante. Un tel système intégré est illustré par la Figure 2. Cette intégration, au-delà d'offrir une amélioration de la densité volumique de puissance devrait permettre une meilleure maîtrise des procédés de fabrication et de développer des méthodes de validation et de vérification pour le système complet [3]. En effet, sur un système centralisé (Figure 1), les procédures de validation sont effectuées pour chaque sous-ensemble (convertisseur, machine électrique...) de la chaîne de conversion. En agissant sur toutes les dimensions de ce levier, le DoE se fixe un objectif de 4 kW/L à l'horizon 2022, ce qui revient quasiment à augmenter fortement la densité de puissance volumique par rapport à un système centralisé.

Conjointement à cette notion d'intégration, le fractionnement des chaînes de conversion électromécanique constitue également un levier pour répondre à l'enjeu de :

- Fiabilité et résilience de la chaîne de conversion.

Cet objectif est également très intéressant dans le contexte applicatif automobile où la sûreté de fonctionnement est nécessaire pour des questions de sécurité pour les usagers et également de réputation pour les constructeurs. La conception de convertisseurs statiques modulaires associés à des portions de machine électrique peut mener à l'obtention d'un système global fractionné plus résilient. La partie suivante présente quelques solutions d'intégration et détaille cette notion de fractionnement, montrant dans quelles mesures elle peut faciliter l'intégration de puissance.

2 – Solutions actuelles d'intégration

Cette partie aborde les différents degrés d'intégration qui sont actuellement envisagés dans des études prospectives dont certaines ont donné lieu à des prototypes intégrés dans des véhicules. Suite à une présentation des prémices de l'intégration des chaînes de traction, la notion de fractionnement est introduite.

2.1 - Suppression des connectiques longues

Pour intégrer une chaîne de conversion électromécanique en un seul système regroupant les fonctions d'alimentation et de conversion électromécanique, une méthode consiste à optimiser la disposition des différents éléments présents dans le système centralisé (Figure 1) et ainsi réduire l'encombrement. Le premier pas dans cette démarche est d'assembler mécaniquement le carter de la machine et celui du convertisseur statique, comme dans les exemples apparaissant sur la figure 3.

Cette méthode se résume à un problème d'assemblage cherchant à intégrer au mieux les structures traditionnelles. De nombreuses solutions élaborées suivant cette méthode sont présentées dans [3]. Le principal intérêt étant de réduire la longueur des connectiques pour limiter les perturbations électromagnétiques rayonnées ainsi que de réduire la masse et le coût du système global. En effet, la longueur des câbles qui relie traditionnellement le convertisseur à la machine a tendance à se comporter comme une antenne sous l'effet des commutations rapides du convertisseur statique. De plus, les phénomènes de réflexion qui interviennent à l'interface entre les câbles et la machine, dus à des différences d'impédances caractéristiques, engendrent des surtensions aux bornes des isolants des bobinages de la machine. Ces tensions transitoires élevées sont néfastes pour les isolants et ont tendance à dégrader leur durée de vie [2].

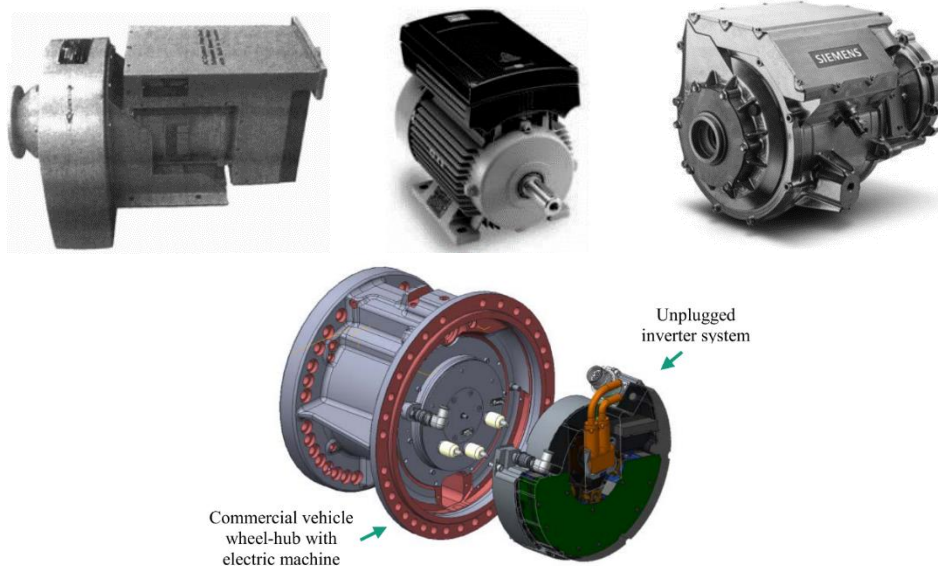


Figure 3 : Intégration sommaire, réduction des connectiques, source [3]

Le carter de la machine et son circuit magnétique représentent également un blindage permettant de confiner les perturbations électromécaniques générées par le convertisseur. Cet aspect peut donc être également exploité lorsque le convertisseur statique est proche de la machine.

Cependant, comme précisé dans l'introduction, la proximité de l'électronique de puissance et de la machine peut avoir des effets néfastes sur les deux parties. Une fois placés au plus près de la machine, le conditionnement des convertisseurs statiques doit leur permettre de résister aux vibrations et aux contraintes mécaniques induites par le moteur électrique. Cet aspect est un verrou technologique à lever pour conserver le niveau de fiabilité requis par le secteur du transport. De même, la machine souffre des commutations rapides imposées par le convertisseur statique. Ces dégradations et leurs sources sont détaillées dans le paragraphe suivant.

2.2 - Vieillessement de la machine

Sous l'effet des commutations rapides des composants d'électronique de puissance, plusieurs phénomènes de dégradation de la machine électrique apparaissent. Cette partie se focalise entre autres, sur les phénomènes de dégradation des isolants des bobinages et d'usure des roulements mécaniques. Ces phénomènes sont apparus dès les premières associations d'onduleurs et de machine et sont d'ailleurs des causes majeures de dysfonctionnement. En revanche, la tendance à l'augmentation des fréquences de découpage de l'électronique de puissance amplifie ces mécanismes de dégradation.

Les connectiques longues peuvent entraîner des surtensions issues des phénomènes de réflexion dans le câble, en revanche elles permettaient d'atténuer les variations de tensions perçues par le bobinage des machines. Dans un contexte d'intégration profonde de l'électronique de puissance au sein de la machine, les surtensions sont évitées mais les bobinages risquent de subir d'autant plus les effets des commutations rapides.

Les décharges partielles qui peuvent survenir entre des spires voisines lors de l'application de fortes variations de tension accélèrent le vieillissement des isolants [4]. Un filtre supplémentaire doit parfois être interposé entre le convertisseur et la machine pour atténuer ces effets mais cette solution technologique ne convient pas pour l'intégration de puissance car elle nécessite l'ajout de composants passifs volumineux.

Autre conséquence, la circulation des courants de mode commun à travers les paliers mécaniques est facilitée lorsqu'on augmente la vitesse de commutation des interrupteurs. La figure 4 montre les effets capacitifs parasites entre les bobinages du stator alimentés par l'onduleur et la carcasse au travers des roulements à billes.

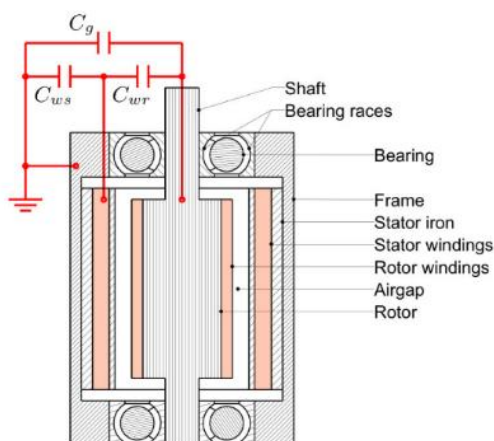


Figure 4 : Chemins capacitifs associés aux courants de mode commun, source [5]

Ces courants apparaissent sous la forme de décharges entre les billes et les bagues du roulement. Ils ont tendance à dégrader l'état de surface des chemins de roulement comme le montre les Figures 5 et 6. Cette dégradation réduit la durée de vie des paliers.



Figure 5 : Cannelure des roulements sous l'effet des courants de mode commun, source [6]

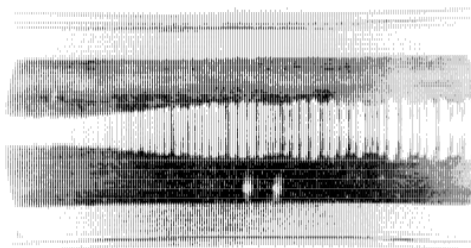


Figure 6 : Etat de surface montrant l'usure d'un chemin de roulement due aux courants de mode commun, source [7]

Des solutions fondées sur des paliers en céramique sont moins sensibles à ces phénomènes de mode commun tout en se révélant plus onéreuses.

Les deux conséquences que nous venons d'étudier sont induites par l'utilisation d'interrupteurs à commutations rapides dans le cadre de l'alimentation des machines électriques et sont des causes majeures de dysfonctionnement des machines électriques. L'intégration des convertisseurs statiques au sein des machines doit donc se faire en minimisant ces effets. Le fractionnement des alimentations et l'utilisation de niveaux de tension faible, présentés dans la partie suivante permettent de diminuer les contraintes sur la machine.

2.3 - Niveaux de tension employés

Dans la plupart des véhicules électriques et hybrides commercialisés actuellement, la tendance est à l'utilisation de tension continue de plusieurs centaines de volts en amont des onduleurs [7]. Cela permet entre autres, à même puissance de réduire les niveaux de courant dans la machine et donc l'échauffement des conducteurs. La vitesse de base de la machine est également augmentée. Cependant, ces niveaux de tensions requièrent de nombreuses protections pour assurer la sécurité des personnes dans le contexte applicatif de l'électrification automobile. L'utilisation d'un niveau de tension dit « Très Basse Tension » (TBT) inférieur au 120 V continu (Norme NF C18-510) facilite grandement une intervention humaine en cas d'opération de maintenance ou suite à un accident

de la route. Pour satisfaire cette exigence sécuritaire de nombreux constructeurs et équipementiers envisagent l'utilisation d'un bus de tension continue de 48 V pour des applications de plusieurs dizaines de kW [9]. De telles valeurs de tension permettent également de recourir à des interrupteurs à très faible résistance à l'état passant comme les transistors MOSFETs BT. Ces composants génèrent donc moins de pertes en conduction ce qui peut permettre de réduire la dimension des échangeurs thermiques. L'un des objectifs de la diminution des tensions employées est également de diminuer les niveaux de (dv/dt) et de tension de mode commun qui accélèrent le vieillissement de la machine électrique, comme précisé dans la partie précédente. Pour une même machine, reconsidérer l'alimentation des bobinages permet de réduire les niveaux de tension nécessaires sans dégrader la puissance convertible. Plusieurs solutions technologiques permettant cette reconfiguration sont présentées dans la partie suivante.

2.4 - Fractionnement et modularité

Dans le cadre des machines polyphasées, l'augmentation du nombre de phases, à même niveau de courant, permet d'utiliser une tension de bus plus faible. Cette approche, que l'on pourrait assimiler à un fractionnement du nombre de phases permet également de rendre le système plus résilient en cas de défaillance d'une phase. La qualité du couple peut être maintenue lors de la perte d'une phase sans recourir à l'utilisation d'un neutre distribué ou d'onduleur monophasé 4 quadrants sur chaque bobinage.

Une autre approche consiste à fractionner l'alimentation des différents enroulements constituant une phase au lieu de les associer en série comme c'est le cas dans les systèmes centralisés présentés dans la première partie. Ce fractionnement fournit de nouveaux degrés de liberté qui peuvent être exploités pour faciliter l'intégration des modules d'électronique de puissance au sein de la machine. Cette démarche vise à reconsidérer l'association du convertisseur statique et du bobinage de la machine pour favoriser les possibilités d'intégration. Le concept de convertisseur intégré modulaire (en anglais Integrated Modular Drive - IMD) peut être décrit par le constat suivant :

- Un moteur électrique possède de nombreuses symétries axiales. Il peut être fractionné selon ces symétries afin que chaque portion du moteur soit alimentée par un module d'électronique de puissance placé au plus près du bobinage.

Traditionnellement, une machine triphasée est associée à un seul onduleur triphasé quel que soit son nombre de paires de pôles. Chaque phase est obtenue par la mise en série ou parallèle des différentes bobines localisées sur chaque pôle. Il est possible de fractionner la machine selon ses différents pôles et d'alimenter chaque sous-ensemble par des convertisseurs distincts. Cela permet de réduire les niveaux de tension continue employés et d'obtenir de la redondance dans la structure.

Parmi les techniques de bobinages employées, le bobinage concentré autour des dents statoriques semble le plus adapté pour cette notion de fractionnement car les bornes d'accès aux enroulements sont plus proches que dans le cas des bobinages à pas diamétral.

La Figure 7 représente un type de fractionnement qui peut être employé. Dans cette proposition [10], chaque bobinage est associé à un convertisseur. Un tel agencement présente également un intérêt du point de vue de la gestion thermique du convertisseur. Les échangeurs thermiques associés à ce module sont directement au contact de la tôle, optimisant ainsi l'évacuation des pertes du convertisseur vers le puit thermique constitué par le grand volume de matière conductrice de chaleur associé au circuit magnétique du moteur.

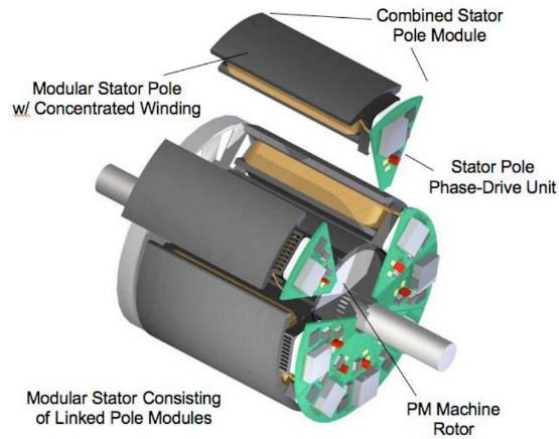


Figure 7 : Un convertisseur associé à chaque enroulement dans le cadre d'un bobinage concentré, source [10]

Pour exploiter le nombre de paires de pôles de la machine, il peut être envisagé de subdiviser la machine en plusieurs sous-systèmes triphasés, chacun associé à un convertisseur distinct. Le schéma de droite de la Figure 8 montre une mise en parallèle des différents modules triphasés. Avec une telle alimentation, la tension du bus DC requise est divisée par le nombre de subdivisions.

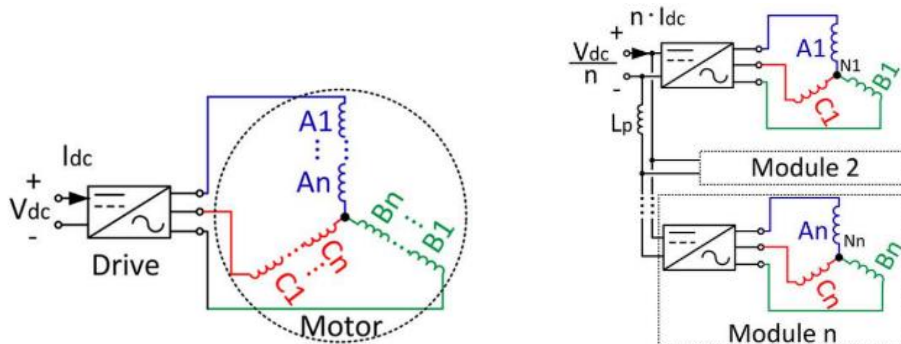


Figure 8 : Structure conventionnelle et subdivision en n modules triphasés, source [11]

Une telle structure fractionnée donne de nouveaux degrés de liberté. Par exemple, il peut être envisagé d'entrelacer les porteuses des PWM de chaque sous module afin de réduire les ondulations de courant [12] ou bien de diminuer les niveaux de tension de mode commun [13].

La granularité du concept de fractionnement, peut être ramenée à différentes échelles. La figure 9 montre un concept de machine possédant un bobinage statorique à cage, similaire à la cage d'écuréuil des rotors de machines asynchrones. Les encoches du circuit magnétique statorique sont donc remplies par des barres conductrices, toutes court-circuitées à l'une de leur extrémité et associées à une cellule de commutation de l'autre côté.

Cette structure présente de nombreux avantages en termes de fabrication, la cage étant beaucoup plus simple à réaliser qu'un bobinage de fil conducteur. L'évacuation des pertes générées dans les conducteurs est également facilitée dans cette structure car la couronne conductrice réalisant le court-circuit à l'une des extrémités peut être employée pour drainer les calories depuis l'intérieur du stator. De nombreux degrés de liberté peuvent être utilisés dans la commande.

Ainsi, par exemple, dans le cas de l'utilisation d'un rotor de machine asynchrone, le nombre de paires de pôles de la machine peut être géré dynamiquement permettant ainsi de profiter d'une boîte de vitesse électrique [14].

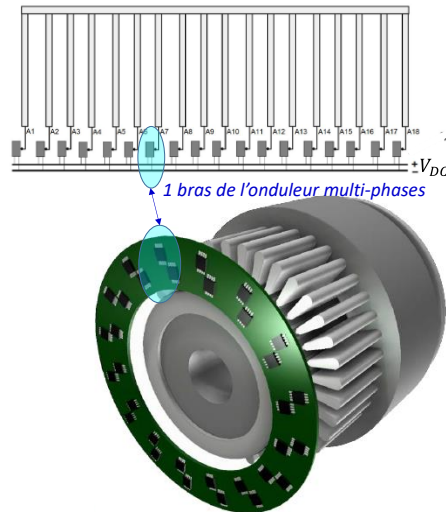


Figure 9 : Association d'un convertisseur à chaque encoche, source [14]

Au-delà de l'association convertisseur/encoche, le brevet [15,16] propose d'associer un convertisseur à chaque spire.

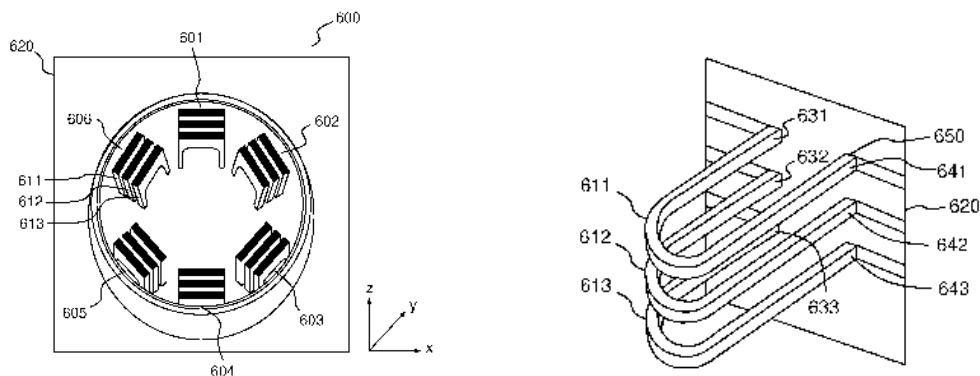


Figure 10 : Association d'un convertisseur à chaque spire, source [15]

La Figure 10 représente des spires partageant la même dent statorique et une solution technologique pour les raccorder au PCB d'électronique de puissance. Cette solution pousse la granularité du fractionnement à l'extrême et apporte une solution à la réduction des niveaux de tension nécessaires à la structure. Bien que ces structures fractionnées présentent une grande résilience, la complexité de leur commande est beaucoup plus importante que ce qu'elle pourrait être dans le cadre d'une chaîne de conversion centralisée (Figure 1). En effet, le nombre de paramètres et de degrés de libertés du système augmentant avec le nombre de fractionnement, il peut être envisagé d'employer une multitude de petites unités de contrôle plutôt qu'un unique contrôleur surdimensionné centralisant toutes les commandes [17].

Enfin, l'augmentation du nombre de fractionnement va de pair avec l'augmentation du nombre de composants semi-conducteurs et les études sur cycle de vie à conduire sur un tel système sont beaucoup plus complexes que l'analyse sur cycle de vie d'un système traditionnel. Les modules de puissance comportant des composants en Silicium sont les plus fiables actuellement et les plus à même de remplir les exigences requises par le contexte applicatif de l'automobile. Or, dans l'optique de mutualiser les systèmes de refroidissement de la machine et du convertisseur, il faut s'assurer de la compatibilité de leur température de fonctionnement. La partie finale de cet article expose les limites thermiques de l'emploi des technologies Silicium et les possibilités offertes par les nouveaux composants à large bande interdite.

3 – Perspectives offertes par l'utilisation des composants à large bande interdite

Fondés sur des interrupteurs au silicium (Si), les convertisseurs statiques traditionnels, malgré leur grande fiabilité ne sont pas adaptés pour fonctionner avec un bon rendement dans un environnement thermique rude. Cet aspect exclut leur utilisation dans des solutions d'intégration profonde de l'électronique de puissance au sein des machines électriques. En effet, pour assurer la meilleure compacité du système de refroidissement, il est important d'accepter une température élevée facilitant les échanges thermiques. Or, de par les contraintes de ses constituants (conducteurs, isolants électriques, aimants, circuit magnétique), la machine électrique peut supporter des températures au-delà de 100°C. En revanche, compte-tenu de sa bande interdite modeste (1,1 eV), les propriétés électriques du Si sont facilement affectées par l'agitation thermique, ce qui limite concrètement l'utilisation nominale du cœur du composant à environ 100 °C et donc son dissipateur à une température moindre. De plus la résistance à l'état passant R_{DSon} augmente significativement avec la température. Le tableau 2 montre les données fournies par le constructeur à propos d'une cellule de commutation MOSFET Si. On remarque que la valeur de R_{DSon} double pour un écart de température de 100°C.

Température de jonction (°C)	V_{GS} (V)	I_D (A)	R_{DSon} (mΩ)
25	10	10,4	9,9
125	10	10,4	18,7

Tableau 1 : Donnée constructeur pour un MOSFET Si 100V/48A, source [18]

Avec des modules au Si, les attentes en termes de rendement ne peuvent donc pas être atteintes pour une température de fonctionnement de l'ordre de celle régnant dans le carter d'une machine électrique. Pour ces deux raisons, il est donc inconcevable de mutualiser les systèmes de refroidissement. En revanche, les nouvelles technologies de composants fondées sur des semi-conducteurs (Wide-bandgap semiconductors) présentent des bandes interdites élevées (supérieures à 3eV) rendant leurs propriétés électroniques nettement moins sensibles à l'augmentation de la température ; ils peuvent donc tolérer des températures de fonctionnement supérieures à celle du silicium, et compatibles avec celle des machines électriques. L'arrivée de cette nouvelle génération de composants permet donc de reconsidérer une intégration profonde des convertisseurs statiques au sein des machines électriques.

3.1 - Comparaison des propriétés physiques des différents semi-conducteurs d'électronique de puissance

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 Si, ce qui leur confère, entre autres, une meilleure tenue en tension et permet un fonctionnement à plus haute température. Le Tableau 2 illustre ces différentes propriétés.

Property	Si	GaN	SiC
Bandgap (eV)	1.1	3.4	3.2
Electron mobility (cm ² /Vs)	1450	2000	900
Critical electric field (MV/cm)	0.3	3.5	3.0
Electron saturation velocity (10 ⁷ cm/s)	1.0	2.5	2.2
Thermal conductivity (W/cm-K)	1.5	1.3	5.0
Maximum operating temperature (°C)	200	300	600
Specific heat capacity (J/KgK)	712	490	681

Tableau 2 : Propriétés des semi-conducteurs à large bande interdite, source [19]

Les composants dits « à grand gap » possèdent une largeur de bande interdite trois fois plus grande que celle du Si. Cela explique la grande différence que l'on peut observer dans les valeurs de champ critique : celles du SiC et du GaN sont dix fois supérieures à celle du Si. Ce point est important car pour des composants verticaux, c'est-à-dire Si ou SiC (Figure 11), lorsqu'on diminue le calibre de tension du composant, l'épaisseur de matériau peut être réduite, ce qui induit mécaniquement une diminution intéressante de la chute de tension à l'état passant. Cet aspect peut inciter au fractionnement des chaînes de conversion afin de réduire le calibre de tension et donc les pertes par conduction. Les composants GaN quant à eux sont horizontaux (Figure 11) et profitent d'une mobilité électronique très élevée qui leur permet également de bénéficier d'un RDS(on) très avantageux comparativement à un composant au Si. Enfin, concernant la température de fonctionnement, les limites théoriques des interrupteurs à grand gap sont également nettement supérieures à celles du Si. En plus d'une compatibilité thermique avec la machine électrique, cette propriété leur permet d'offrir des densités de courant nettement supérieures. Ainsi, pour un même calibre de courant, leur surface est réduite ce qui diminue fortement les capacités parasites et par voie de conséquence diminue significativement les temps de commutation. Ainsi, pour une même fréquence de commutation, les pertes par commutation des composants SiC ou GaN sont nettement inférieures à celle des interrupteurs Si.

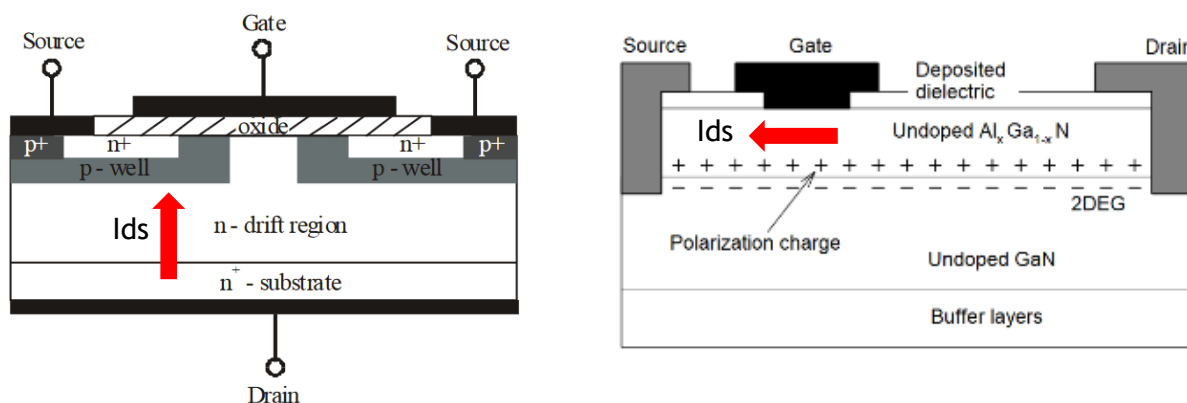


Figure 11 : Structure de MOSFET SiC ou Si « vertical » (à gauche), et de GaN HEMT « horizontal » (à droite), source [20,21]

En résumé, les composants à grand gap offrent le triple avantage d'accepter les mêmes températures de refroidissement que la machine, de réduire les pertes et de diminuer la surface effective du refroidisseur par augmentation de la température de l'échange avec le milieu ambiant. Ce triple effet permet donc de réduire l'encombrement des échangeurs thermiques [22]. Dans un premier temps, la Figure 12 illustre la réduction du volume des échangeurs au fur et à mesure que sa température de fonctionnement augmente, toute chose étant égale par ailleurs, en particulier la fréquence de commutation.

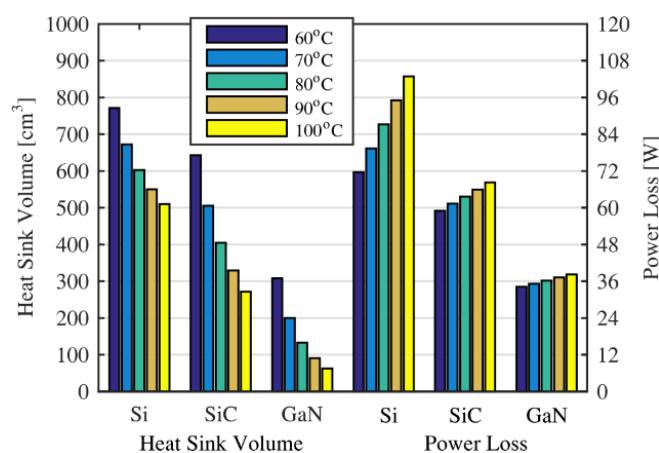


Figure 12 : Comparaison des pertes et du volume du radiateur d'une cellule de commutation à 32 kHz pour les trois technologies, source [22]

De plus, les composants fabriqués à partir de semi-conducteurs à grand gap se distinguent également par leur rapidité de commutation. Cette propriété leur permet de limiter les pertes en commutation et donc de supporter des fréquences de commutation plus élevées que les composants Si pour un même rendement. La Figure 13 illustre cet aspect en représentant les pertes globales générées par une cellule de commutation en fonction de la fréquence de découpage pour trois technologies de composants à semi-conducteurs :

- Si : Composant de type « Insulated Gate Bipolar Transistor » IGBT ;
- SiC : Composant de type « Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor » MOSFET ;
- GaN : Composant de type « High Electron Mobility Transistor » HEMT.

Le calibre en tension de chacun de ces composants est de l'ordre de 600V.

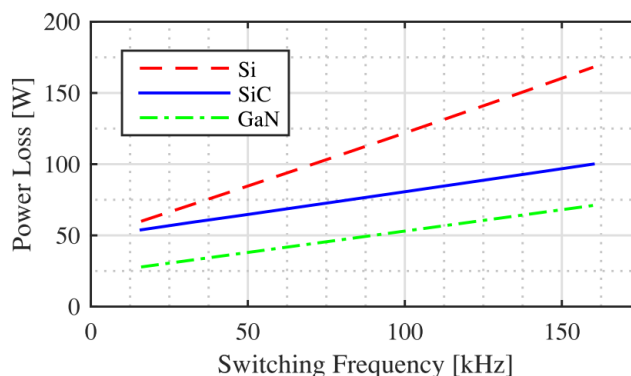


Figure 13 : Comparaison des pertes d'une cellule de commutation de 2,5 kW à 60°C pour les trois technologies, source [22]

Dans le cadre du contrôle d'une machine électrique, cette possibilité de montée en fréquence de commutation présente de nombreux avantages. Citons 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.

Actuellement, on trouve sur le marché une grande variété de composant à large bande et des modules de puissance sont déjà développés en technologie SiC par les industriels (Figure 14). En revanche, ces modules sont conçus pour être utilisés dans des structures de chaînes de conversion décentralisées associés à leur propre organe de refroidissement [22].

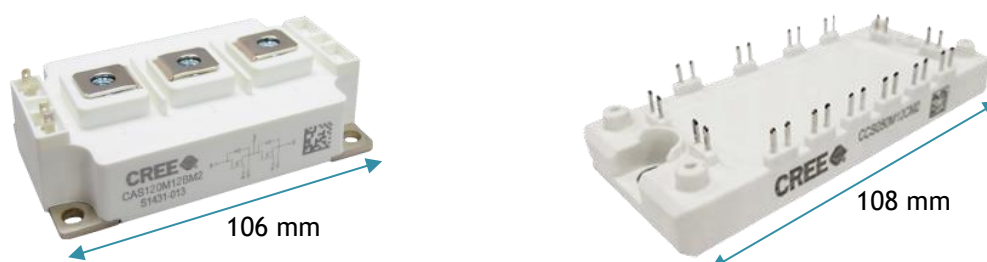


Figure 14 : Exemples de module SiC 1,2kV pour demi-pont 120A (à gauche) et pour onduleur triphasé 50A (à droite)

Malgré tous ces avantages, les modules de puissance constitués de semi-conducteurs SiC ou GaN ne sont actuellement pas assez fiables pour remplacer la totalité de la technologie Si dans les chaînes de conversion des VE ou VEH. De plus, dans le contexte d'intégration profonde de l'électronique de puissance à la machine, plusieurs verrous technologiques limitent le développement de ces solutions de chaînes de conversion intégrées. Ces faiblesses sont évoquées dans la partie suivante

et constitue les principales perspectives de recherche pour cette nouvelle génération de composants.

3.2 - Axes de recherche pour l'intégration des composants « grand gap » au sein des machines

Pour résumer, l'électronique de puissance doit être assez robuste pour endurer les conditions thermiques propres aux machines électriques. Pour cela, l'utilisation des composants à large bande interdite est envisagée et permet également d'augmenter la fréquence de découpage. Cependant, il faut analyser et comprendre l'effet de leurs commutations extrêmement rapides (dizaines de ns) sur la machine électrique associée et en particulier vis-à-vis du vieillissement de ses isolants et de ses roulements mécaniques. Pour permettre l'intégration de ces composants au plus près de la machine sans trop accélérer son vieillissement, les méthodes de fractionnement présentées dans la partie précédente peuvent être employées. Elles peuvent permettre de limiter les niveaux de (dv/dt) et de tension de mode commun sans ralentir la commutation des composants d'électronique de puissance. Dans cette hypothèse, le système global peut profiter des faibles pertes par commutation de ces composants et la gestion thermique du convertisseur en est facilitée.

Comme axe d'ouverture, il faut garder à l'esprit que les technologies de conditionnement de la puce (« packaging ») ont initialement été développées à partir des propriétés du Si et sont prévues pour des températures internes inférieures à 150°C [23]. L'emploi des semi-conducteurs à large bande interdite implique le développement de nouvelles technologies de packaging et de gestion thermique pour exploiter le fait que les nouveaux composants peuvent supporter des températures de fonctionnement plus élevées.

De plus, pour une intégration des convertisseurs d'électronique de puissance au sein de la machine électrique, les convertisseurs statiques sont fortement sollicités thermiquement et mécaniquement.

Si les contraintes sur la machine sont réduites par l'utilisation de structures fractionnées, la gestion des contraintes mécaniques reste problématique, entre autres, vis-à-vis du vieillissement de leurs connectiques et des soudures [24,25].

Pour toutes ces raisons, ces composants n'atteignent actuellement pas le niveau de fiabilité requis pour les applications automobiles. Encore moins dans le cas d'une intégration profonde de l'électronique de puissance au sein des machines électriques. Leur utilisation future dans le secteur automobile dépend donc principalement du développement technologique de leur conditionnement thermique et mécanique.

4 – Conclusion

Dans cet article, le contexte de l'intégration de l'électronique de puissance au plus près des machines électriques a pu être resitué au sein de la démarche globale qui est entreprise dans le secteur de l'électrification automobile. Pour les industriels, il s'agit d'augmenter la densité de puissance de la chaîne de traction, convertissant l'énergie électrique de la batterie en énergie mécanique en bout de roue. Cette amélioration doit se faire conjointement avec le respect des exigences attendues dans ce contexte applicatif en termes de fiabilité. Actuellement, seules les technologies d'électronique de puissance au Silicium (Si) sont assez matures pour être installées dans des Véhicules Electriques (VE). En revanche, les températures de fonctionnement garantissant un rendement intéressant avec cette technologie ne sont pas compatibles avec les températures régnant au sein des machines. Cela ne permet donc pas de rapprocher l'électronique de puissance Si à proximité de la machine. En revanche, quelques méthodes de fractionnement ont été

présentées comme permettant de réduire les niveaux de tension employés et donc d'utiliser des composants MOSFET au Si présentant moins de pertes en conduction. Le fractionnement permet également d'extraire plus facilement les pertes en décentralisant l'échauffement de l'électronique de puissance. Cependant, les pertes en conduction ont tendance à augmenter avec la température de fonctionnement ce qui limite l'utilisation des composants Si même dans le cas du fractionnement. Un axe de recherche consiste à employer des composants au semi-conducteur à large bande interdite Nitrure de Gallium (GaN) ou Carbure de Silicium (SiC). Ces composants peuvent théoriquement supporter des températures de fonctionnement plus élevées. Ils pourraient donc être envisagés dans l'intégration de puissance au plus près des machines électriques. Ensuite, le fait qu'ils puissent commuter rapidement réduit d'une part les pertes par commutation mais a tendance d'autre part à accélérer le vieillissement de la machine. Ainsi, l'intégration de cette nouvelle génération de composant pourrait se faire conjointement avec l'utilisation des méthodes de fractionnement pour tirer parti des avantages de ces semi-conducteurs sans dégrader la durée de vie de la machine. Avant de considérer l'intégration de puissance dans les véhicules électriques, la création de chaîne de conversion intégrée devrait tout d'abord prendre place dans les applications hybrides pour lesquelles la puissance nécessaire est plus faible. Ce contexte est le plus à même de voir émerger des solutions intégrées basse-tension ayant recours aux composants semi-conducteurs à large bande interdite.

Références :

- [1]: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/everywhere_blueprint.pdf
- [2]: C. Zoeller, T.M Wolbank, M.A. Vogelsberger. Inverter-fed drive stator insulation monitoring based on reflection phenomena stimulated by voltage step excitation.
- [3]: R. Abebe, G. Vakil R. Abebe, G. Vakil, G. Lo Calzo, S. Lambert, M. Johnson, C. Gerada, B. Mecrow. Integrated motor drives : state of the art and future trends.
- [4]: V. Bolgova, S. Lefebvre, S. Hlioui, N. Boucenna, F. Costa, A. Leonov Development of testing methods for winding turn-to-turn insulation of low voltage motors fed by PWM converters.
- [5]: S. Narasimhan, S. Tewari, E. Severson, R. Baranwal, N. Mohan. Mitigation of Common-mode Noise in Wide Band Gap Device Based Motor Drives.
- [6]: F. He, G. Xie, J. Luo. Electrical bearing failures in electrical vehicles.
- [7]: D. Busse, J. Erdman, R.J. Kerkman, D. Schlegel, G. Skibinski. System Electrical Parameters and Their Effects on Bearing Currents.
- [8]: K.M. Cissé, S. Hlioui, Y. Cheng, M.H. Belhadi, M. Gabsi. Etat de l'art des topologies de machines électriques utilisées dans les véhicules électriques et hybrides.
- [9]: VALEO 48V hybride rechargeable : l'hybride rechargeable au meilleur coût.
<https://www.valeo.com/fr/48v-le-futur-des-vehicules-hybrides/>
- [10]: N.R. Brown, T.M. Jahns, R.D. Lorenz. Power Converter for an Integrated Modular Motor Drive.
- [11]: J. Wang, Y. Li, Y. Han. Integrated Modular Motor Drive Design With GaN Power FETs.
- [12]: C. Alosa, F. Immovilli, E. Lorenzani. Modular Multi-Three-Phase Electric Drives for Enhanced Reliability and Current Ripple Minimization.

[13]: D. Han, W. Lee, S. Li, B. Sarlioglu. A New Method for Common Mode Voltage Cancellation in Motor Drives: Concept, Realization, and Assymetry Influence.

[14]: F. Bachheibl, G. Dajaku, A. Patzak, D. Gerling. Control Strategy and Functional Safety for the Intelligent Stator Cage Drive (ISCAD)

[15]: 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.

[16]: A. Cizeron, J. Ojeda, E. Labouré, O. Béthoux. Prediction of PWM-induced Current Ripple in Subdivided Stator Windings Using Admittance Analysis.

[17]: G. Gateau, P.Q. Dung, M. Cousineau, P.U. Tran, L.H. Nhan. Digital Implementation of Decentralised Control for Multilevel Converter.

[18]: FDMD85100 Dual N-Channel PowerTrench®MOSFET

[19]: A. Morya, M.C. Gardner, B. Anvari, L. Liu, A.G. Yepes, J. Doval-Gandoy, H.A. Toliyat. Wide Bandgap Devices in AC Electric Drives: Opportunities and Challenges.

[20]: R. Siemieniec, U. Kirchner. The 1200V Direct-Driven SicJFET power switch.

[21]: S.Dimitrijević, J. Han, D. Haasmann, H.A. Moghadam, A. Aminbeidokhti. Power Switching Applications Beyond Silicon : The Status and Future Perspectives of SiC and GaN devices.

[22]: E. Gurpinar, A. Castellazzi. Single-Phase T-Type Inverter Performance Benchmark Using Si IGBTs, SiC MOSFETs, and GaN HEMTs.

[23]: Z. Matallana, E. Ibarra, I. Lopez, J. Andreu, J.I. Garate, X. Jorda, J. Rebollo. Power module electronics in HEV/EV applications: New trends in wide-bandgap semiconductor technologies and design aspects

[24]: F. Farina, D. Rossi, A. Tenconi, F. Profumo, S.E. Bauer. Thermal design of integrated motor drives for traction applications.

[25]: L.A. Navarro, X. Perpina, P. Godignon, J. Montserrat, V. Banu, M. Vellvehi, X. Jorda. Thermomechanical Assessment of Die-Attach Materials for Wide Bandgap Semiconductor Devices and Harsh Environment Applications.