

Tendances technologiques pour les onduleurs de traction des véhicules électriques et hybrides

Les véhicules hybrides qui combinent moteur à combustion interne (ICE) et entraînement électrique (e-drive) ont particulièrement besoin de systèmes de propulsion compacts au bon rapport coût-efficacité. Les microcontrôleurs hautes performances conçus pour les moteurs de traction et dotés d'un bloc d'accélération matériel des calculs mathématiques vectoriels peuvent contribuer à la réalisation d'un design générique optimisé du système électronique et électromécanique. Explications de Renesas.

AUTEUR



Sam Gold,
directeur principal,
Business Unit Automobile,
Renesas Electronics Europe.

La tendance à l'électrification des automobiles, qui s'inscrit dans la transition actuelle vers la neutralité carbone, s'accélère de façon exponentielle ces derniers temps. Le taux de pénétration des véhicules électriques et hybrides (xEV) progresse parallèlement à l'arrivée de réglementations environnementales plus strictes qui s'accompagnent d'innovations technologiques importantes et d'une baisse des coûts.

Presque toutes les régions du monde s'efforcent d'appliquer des réglementations environnementales plus strictes, avec l'Europe qui se positionne clairement en leader, tandis que les normes relatives aux gaz à effet de serre (GES) dans d'autres régions suivent de près. Facteur supplémentaire, on peut s'attendre à des normes d'émissions de GES toujours plus strictes, en particulier aux Etats-Unis, désormais sous une nouvelle administration, ce qui pourrait entraîner une relance de la croissance, en particulier pour les véhicules hybrides (HEV). Cette catégorie de véhicules pourrait en effet constituer une solution disponible rapidement dans la phase de transition vers les véhicules électriques à batteries (BEV).

Du point de vue des constructeurs automobiles, l'hybride léger (systèmes 48V), bien que contribuant à répondre aux nouvelles normes GES, ne sera pas suffisant pour éviter les

amendes liées au non-respect des réglementations sur les émissions de CO₂ de chaque pays (figure 1). On s'attend à ce que le marché mondial des véhicules hybrides et électriques (xEV) se dirige vers une période de longue expansion, avec une baisse du coût des batteries. Des restrictions plus strictes dans tous les pays (tant au niveau des normes d'économie de carburant qu'à celui des réglementations liées aux ventes de véhicules électriques) créeront une demande jusqu'en 2025 environ, suivie d'une transition vers un

modèle de croissance indépendante à partir de 2025, au moment où les technologies de base, y compris les batteries, deviendront progressivement moins chères (figure 2).

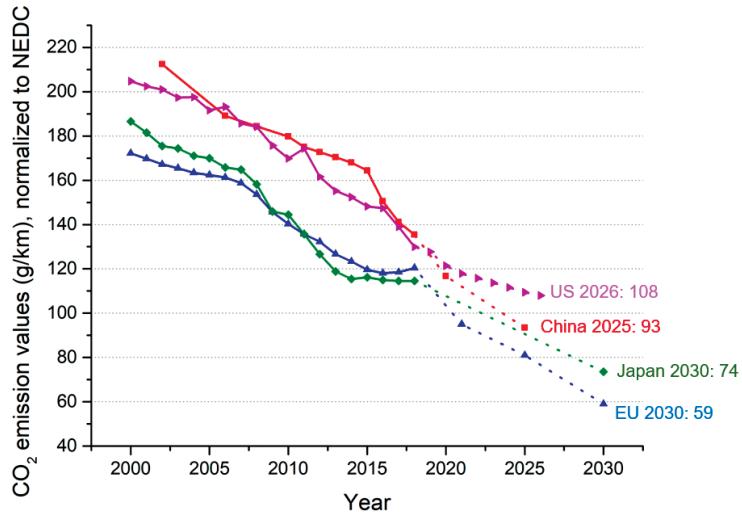
Concept et exigences des systèmes HEV

En fonction des concepts système respectifs, les véhicules hybrides rechargeables (PHEV) et non rechargeables (FHEV) affichent une complexité élevée au niveau de la stratégie de commande coopérative (moteur à combustion interne ICE et

1 RÉGLEMENTATIONS POUR LES GAZ À EFFET DE SERRE (GES) PAR PAYS

Du point de vue des constructeurs automobiles, l'hybride léger (mild hybrid) ne sera pas suffisant pour éviter les amendes liées au non-respect des réglementations sur les émissions de CO₂ de chaque pays.

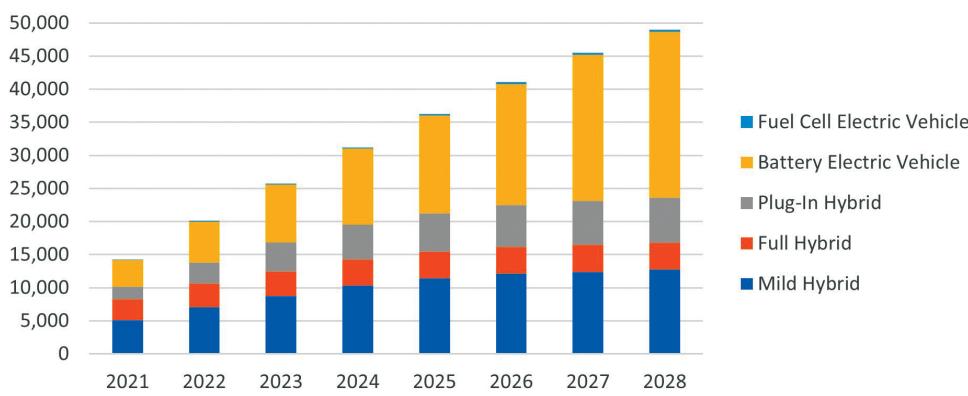
(Source: ICCT, 2020)



2 ÉVOLUTION DU MARCHÉ DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES

Le marché mondial des véhicules hybrides et électriques (EV/HEV) se dirige vers une période de longue expansion, avec une baisse du coût des batteries.

(Source : Strategy Analytics : Marché des systèmes électroniques automobiles - Avril 2021)



entraînement électrique e-drive). De plus, ils sont plus sensibles aux restrictions d'espace qui affectent les composants d'application, simplement en raison de la combinaison et ou de l'ajout des fonctions ICE et e-drive. Cela n'est pas seulement le cas pour les composants électromécaniques, mais aussi pour l'électronique, comme les circuits numériques, les composants analogiques et les composants de puissance.

La complexité système décrite résulte des fonctionnalités de niveau supérieur. Ainsi, lors de la décélération du véhicule, l'énergie cinétique est convertie en énergie électrique par le moteur électrique et stockée dans la batterie. Lors de l'accélération, l'énergie électrique de la batterie est utilisée pour assister le moteur à combustion interne ICE, ce qui permet d'économiser sur la consommation de carburant. Disposer d'un moteur électrique haute puissance pour un véhicule FHEV signifie que l'on dispose d'une capacité de génération élevée afin qu'une quantité plus élevée d'énergie cinétique puisse être recyclée (ou récupérée) pendant la décélération, entraînant ainsi une amélioration de l'efficacité énergétique de l'ordre de plusieurs dizaines de pour cent.

Commande HEV : un concept complexe

Avant de présenter un concept d'IP sur silicium qui peut contribuer à résoudre la complexité des exigences et les contraintes d'espace mentionnées ci-dessus, décrivons brièvement les défis du contrôle/commande HEV. Il existe plusieurs

types d'architectures hybrides, et la figure 3 décrit une vue d'ensemble de haut niveau de ces architectures. Le plus simple est un système hybride parallèle. Un moteur électrique est placé en parallèle avec le moteur ICE. Le moteur/générateur assiste l'accélération en utilisant l'énergie électrique de la batterie et recharge la batterie en utilisant le moteur comme générateur pendant la décélération. L'avantage de ce système est un coût inférieur et une complexité de contrôle moindre.

Dans le cas du système hybride série, l'énergie cinétique créée par le moteur ICE est convertie en énergie électrique par un générateur, puis l'énergie électrique est utilisée pour

générer à nouveau de l'énergie cinétique par un autre moteur. Cette approche peut apparaître comme synonyme de surcoût et gaspillage de l'énergie. Cependant, l'avantage de cette approche est qu'elle permet de faire fonctionner le moteur ICE dans la plage vitesse/couple la plus économique en carburant. Un moteur ICE affiche en effet un faible rendement de carburant à basse vitesse (par exemple, à moins de 1 500 tr/min), à des vitesses élevées (par exemple, au-dessus de 4 000 tr/min) et dans les zones de fonctionnement à faible couple.

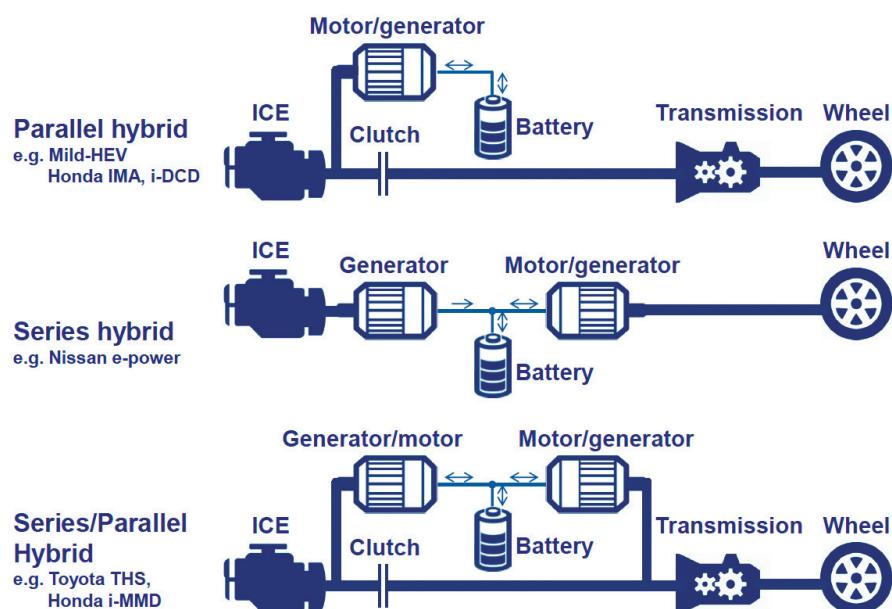
L'hybride série/parallèle est le système le plus complexe. Lorsque le moteur ICE fonctionne dans une plage de

vitesse/couple économique en carburant, la sortie du moteur peut être directement transférée aux roues par le biais d'un embrayage et d'une transmission. Si une assistance au couple est nécessaire, le moteur électrique peut aider à l'accélération et le moteur ICE peut économiser du carburant comme dans un système hybride parallèle. Lorsque la vitesse du véhicule est très lente, l'embrayage est désengagé et le système se comporte comme un système hybride série pour éviter de faire fonctionner le moteur ICE dans une zone de faible rendement en carburant.

Dans le cas des configurations de systèmes hybrides série et série/parallèle, une combinaison de deux dis-

3 VUE DE HAUT NIVEAU DE LA CHAÎNE DE TRACTION DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES HYBRIDES (HEV)

Il existe plusieurs types d'architectures pour la chaîne de traction des véhicules électriques hybrides dont l'architecture hybride parallèle, hybride série et hybride série-parallèle.



positifs moteur/générateur doit généralement être contrôlée étroitement et de manière interdépendante.

Contrôle HEV: défis et solutions

D'après les concepts de systèmes de traction présentés ci-dessus, il est évident que les efforts respectifs de contrôle et de synchronisation, en particulier dans le cas du système hybride série/parallèle, sont complexes, en raison d'une charge de communication élevée entre les deux entités ainsi que des efforts de diagnostic accrus pour maintenir le niveau ASIL ciblé.

Une solution évidente pour optimiser ces efforts consiste à intégrer les deux systèmes de contrôle de l'onduleur de traction dans une seule unité ECU, gérée par un seul microcontrôleur (MCU) hautement spécialisé. En utilisant un tel concept, la synchronisation entre les deux boucles de contrôle de l'onduleur peut être mise en œuvre au sein d'un seul contrôleur, ce qui entraîne une bande passante de communication élevée et une latence faible. De plus, les concepts de diagnostic et de

sécurité fonctionnelle deviendront plus simples grâce au choix d'un équipement cible conforme au niveau ASIL recherché. L'autre avantage d'une solution intégrée est une facture matérielle (BOM) fortement optimisée qui s'accompagne d'un encombrement réduit pour les composants, deux conséquences très appréciées pour la conception système globale.

Un MCU avec prise en charge xEV intégrée

L'un des atouts clés des MCU spécifiques aux applications HEV est de pouvoir décharger les opérations mathématiques vectorielles pour l'algorithme de commande moteur sur une IP de traitement particulière. En utilisant cette méthode, le MCU peut être équipé d'un plus petit nombre de coeurs de processeur, tout en étant apte à prendre en charge d'autres tâches logicielles comme décrit ci-dessus. Du point de vue de la sûreté de fonctionnement, il devient alors obligatoire d'examiner en profondeur les hypothèses d'utilisation du concept de contrôle HEV intégré, afin de maintenir le niveau ASIL

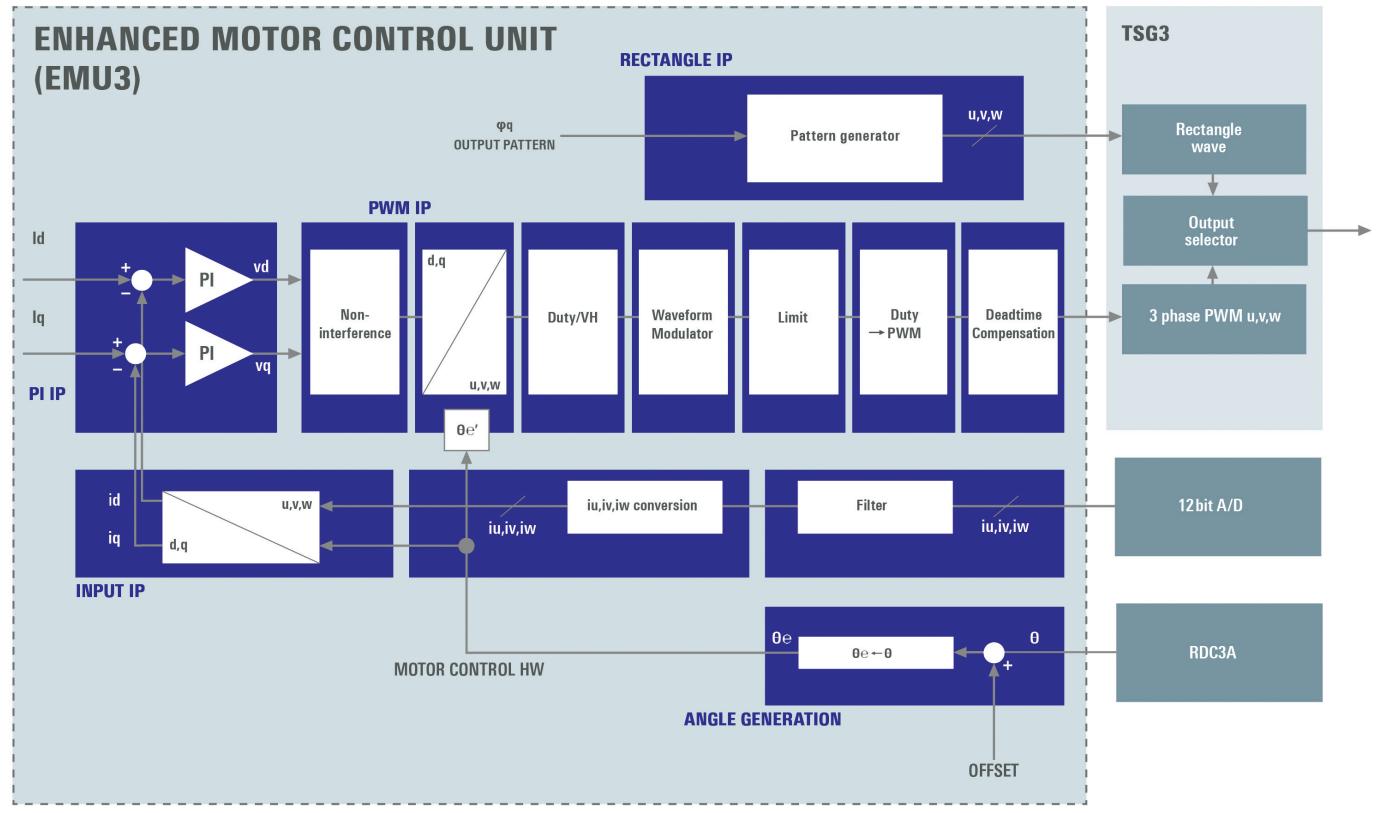
requis pour le MCU en tant qu'élément de sécurité fonctionnelle hors contexte (SEooC).

Une unité de commande moteur améliorée (EMU3)

L'Enhanced Motor Control Unit 3 (EMU Gen3) est un ensemble de modules individuels d'accélération de commande moteur qui calculent les valeurs de comparaison PWM triphasées à l'aide d'un algorithme de contrôle vectoriel, générant des modèles d'onde rectangulaires reposant sur les valeurs de courant moteur mesurées par un convertisseur A/N. De plus, la valeur de l'angle moteur est obtenue grâce à un convertisseur résolveur-numérique intégré (RDC3A), exécutant la fonction d'interface du capteur de position (figure 4). Les résultats des calculs de l'EMU3 sont utilisés par le TSG3, un compteur de gestion de moteur triphasé, pour produire des ondes PWM et rectangulaires. Grâce à l'accélération matérielle des opérations mathématiques vectorielles, le bloc d'IP EMU3 IP peut calculer la prochaine valeur de réglage PWM de manière très rapide. L'IP EMU3

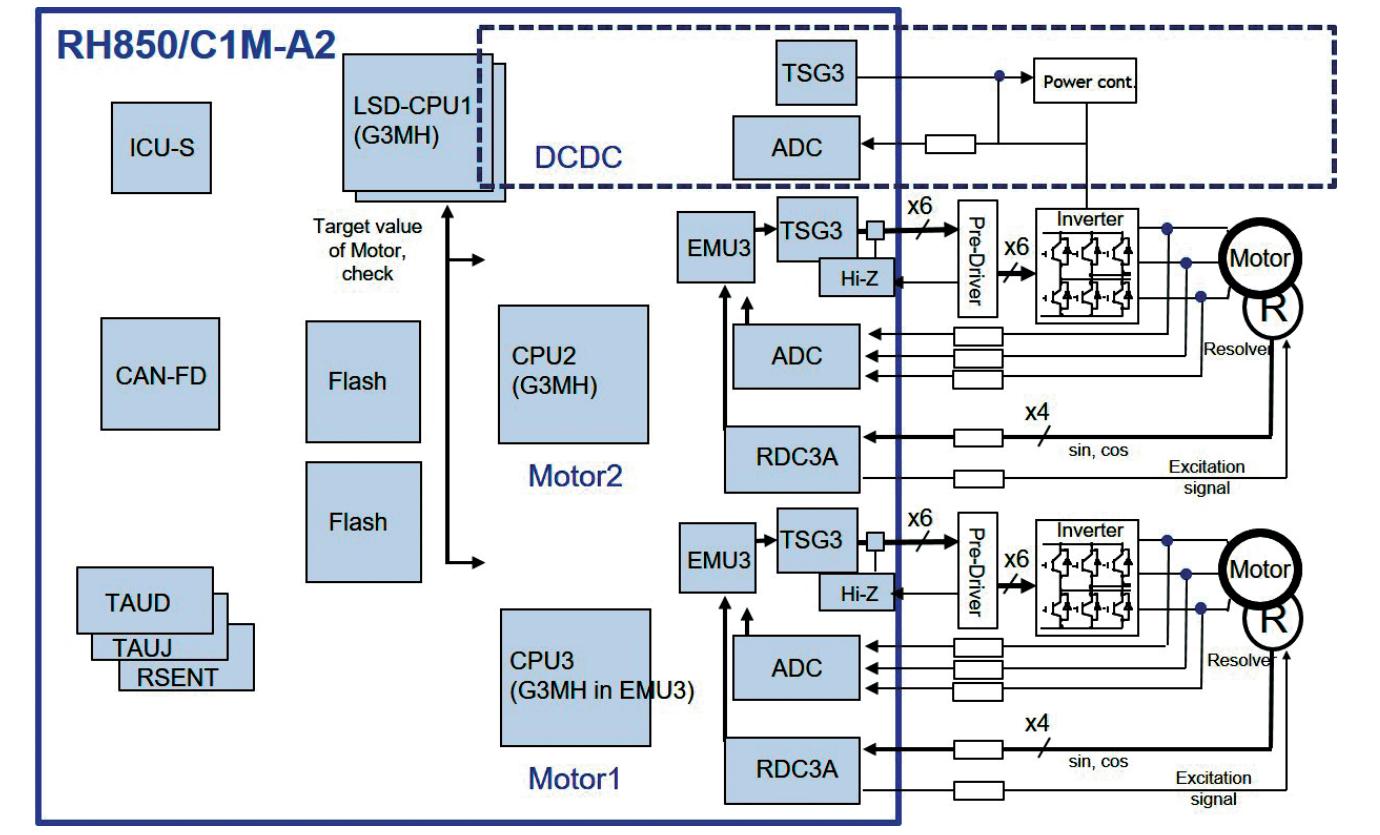
4 BLOC-DIAGRAMME DE L'UNITÉ DE COMMANDE MOTEUR ÉVOLUÉE EMU3

L'Enhanced Motor Control Unit 3 (EMU Gen3) est un ensemble de modules individuels d'accélération de commande moteur qui calculent les valeurs de comparaison PWM triphasées à l'aide d'un algorithme de contrôle vectoriel, générant des modèles d'onde rectangulaires reposant sur les valeurs de courant moteur mesurées par un convertisseur A/N.



5 EXEMPLE DE SYSTÈME POUR CONTRÔLER LE DOUBLE E-MOTEUR/GÉNÉRATEUR

La solution clé pour obtenir une double capacité de commande de moteur électrique/générateur s'appuie sur la manière dont l'IP de contrôle moteur EMU3, ainsi que l'interface intégrée de capteur de position sont incorporées dans le microcontrôleur.



peut aussi exécuter des fonctions de commande moteur en combinaison avec des interventions logicielles spécifiques à l'utilisateur entre n'importe lequel de ses blocs fonctionnels. Ainsi, un concept de contrôle flexible combinant l'accélération matérielle et un logiciel utilisateur spécifique peut être réalisé.

Une commande double e-moteur/générateur

La solution clé pour obtenir une double capacité de commande de moteur électrique/générateur s'appuie sur la manière dont l'IP de contrôle moteur présentée précédemment (EMU3), ainsi que l'interface intégrée de capteur de position sont incorporées dans le microcontrôleur. La figure 5 montre l'approche concrète pour contrôler deux moteurs :

- Les CPU2 et CPU3 contrôlent chacun un moteur respectivement. En utilisant l'EMU3, le traitement des algorithmes de contrôle moteur à haute performance, comme la transformation Park/Clark pour la génération de modèles PWM, est déplacé du CPU vers l'EMU3. Cela permet à d'autres tâches logicielles importantes,

comme le traitement des diagnostics, d'être effectuées par les CPU.

- Le CPU1 peut être utilisé pour d'autres fonctions comme par exemple le contrôle du convertisseur DC/DC en tant que fonction complémentaire intégrée en option pour optimiser la structure globale du système HEV. Les autres fonctions comprennent le contrôle de la communication et les « fonctions d'entretien », y compris les diagnostics.

Le module RDC3A est la double interface résolveur-convertisseur numérique intégrée au MCU (équivalent Tamagawa AU6805), ou plus généralement, l'interface du capteur de position moteur, capable de se connecter aux signaux analogiques du résolveur ou du capteur de position inductif.

Chez Renesas, plusieurs générations de concepts éprouvés pour le contrôle HEV existent grâce au microcontrôleur 40 nm RH850/C1M-Ax. Ce circuit intégré, et ses successeurs gravés en technologie 8 nm, se concentrent sur les fonctions de contrôle de l'onduleur pour les moteurs de traction. Les PMIC, les pilotes de grille et les dispositifs IGBT appropriés, ainsi que les solutions

clé en main d'onduleurs, peuvent réduire considérablement les efforts de R&D des utilisateurs.

Le RH850/C1M-Ax, conforme à la norme ASIL-C, est équipé d'un cœur de processeur 32 bits RH850 G3MH verrouillé en mode lockstep, fonctionnant à une fréquence de 240MHz pour le C1M-A1. On trouve deux cœurs G3MH, dont l'un en mode lockstep, fonctionnant à une fréquence de 320MHz dans le C1M-A2. Outre la ROM, la RAM et les DMA, ces circuits intégrés incluent divers compteurs tels que celui de commande moteur (TSG3), diverses interfaces série, notamment CAN (compatible CAN FD), un convertisseur A/N 12 bits (ADC), un convertisseur R/N (RDC3A) qui convertit le signal de sortie du résolveur en données numériques d'angle du moteur, ainsi qu'un sous-processeur et une unité de commande de moteur parallèle (EMU3), fournissant des fonctions périphériques idéales pour la commande moteur dans les HEV et EV. Un écosystème complet avec des outils incluant le développement dirigé par les modèles complète cette solution de commande d'onduleurs de moteur de traction.