

Comment contrôler les moteurs CC sans balais

Par Mark Patrick, Mouser Electronics

Les moteurs à courant continu sans balais, plus communément appelés moteurs BLDC, sont couramment utilisés dans les appareils grand public, les équipements industriels et les applications automobiles. Par rapport aux moteurs à balais classiques, les moteurs BLDC présentent l'avantage d'être plus fiables et de ne pas nécessiter d'entretien. En revanche, leur système d'entraînement requiert des composants électroniques plus complexes. Dans le présent article, nous examinerons les modes d'entraînement des moteurs BLDC, les méthodes de détection et les algorithmes les plus utilisés. Nous nous pencherons également sur les circuits intégrés d'asservissement proposés par les principaux fournisseurs avant de conclure avec les ressources de développement et de prototypage appropriées.

Applications des moteurs sans balais

Les moteurs BLDC ont beaucoup gagné en popularité au cours de la dernière décennie. Plus omniprésents encore que le Wi-Fi, vous seriez surpris du nombre d'appareils qui en sont dotés chez vous, au bureau et jusque dans votre voiture. Selon le cabinet d'études Allied Market Research, le marché mondial des moteurs à courant continu sans balais pesait 33,2 milliards de dollars en 2020 et devrait atteindre 72,2 milliards de dollars à l'horizon 2030 (voir **figure 1**). Son rapport de recherche « Brushless DC Motors Market Research, 2030 » prévoit un taux de croissance annuel composé de 10,3 % pour toutes les catégories de moteurs répartis selon leur puissance nominale, la croissance la plus significative étant attendue dans la catégorie de moteurs de 750 à 3 000 W.

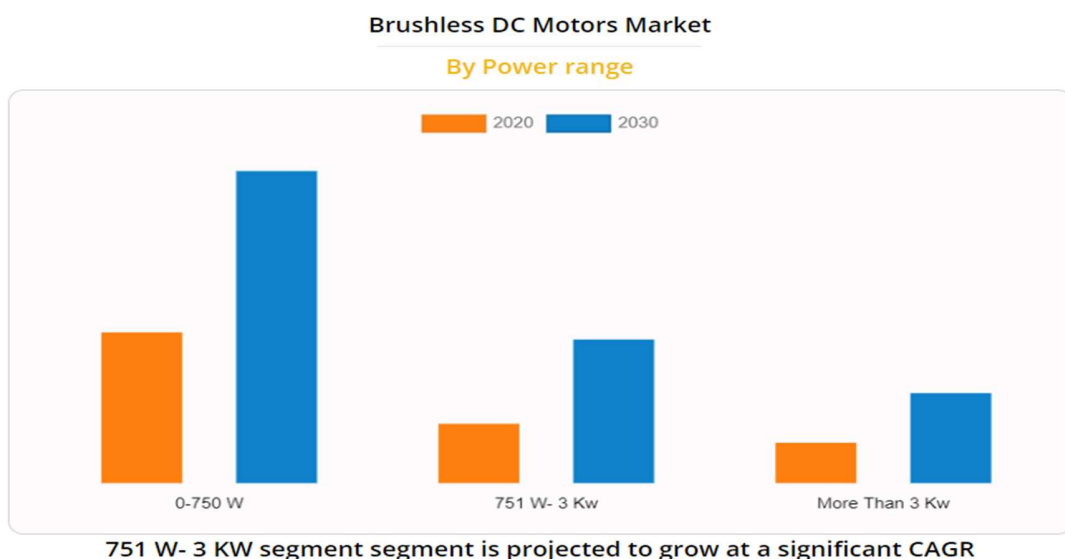


Figure 1 – Croissance des moteurs BLDC de 2020 à 2030 d'après le rapport d'Allied Market Research
(Source : AMR – <https://www.alliedmarketresearch.com/brushless-dc-motors-market> – autorisation demandée)

Les moteurs BLDC conviennent à diverses applications : outils électriques alimentés par batterie, aspirateurs domestiques, drones radiocommandés et véhicules électriques, pour n'en citer que quelques-unes. Dans le secteur industriel, on en retrouve par centaines pour animer toutes sortes de dispositifs, des tapis roulants jusqu'aux robots de production.

Les moteurs BLDC doivent une grande part de leur succès à leur faible exigence d'entretien. Leur efficacité énergétique est élevée et atteint généralement 92 %, soit au moins 10 à 15 % de plus qu'un moteur à balais de même taille. Les moteurs BLDC ont pour autre avantage de pouvoir fonctionner à des vitesses plus élevées en raison de l'absence de frottement des balais. L'absence de balais permet aussi de construire des moteurs plus compacts, pratiquement silencieux et peu sensibles aux interférences électromagnétiques. Ces caractéristiques en font le composant d'entraînement de moteur idéal pour les véhicules électriques, application pour laquelle il est essentiel de pouvoir atteindre un couple et une vitesse élevés.

Les avantages des moteurs BLDC sont toutefois modérés par les inconvénients que représentent leur coût élevé et la complexité de leur asservissement. La **figure 2** compare différents types courants de moteurs en mettant leurs avantages et leurs inconvénients en évidence. Bien que légèrement différents dans leur fonctionnement et dans la construction interne des bobinages du stator, les moteurs BLDC sont assez similaires aux moteurs synchrones à aimants permanents (PMSM).

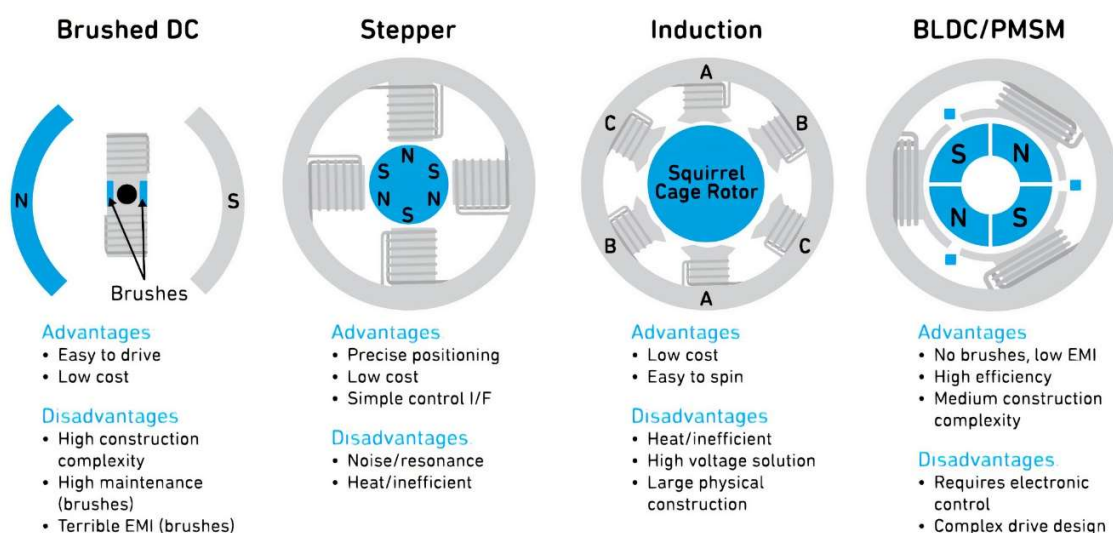


Figure 2 – Types répandus de moteurs à courant continu avec leurs principaux avantages et inconvénients (Source : Qorvo)

Comment fonctionne un moteur CC sans balais ?

Il n'est pas inutile, avant de voir comment fonctionne un moteur BLDC ou PMSM, de revoir brièvement quelques termes essentiels en rapport avec les moteurs.

Enroulements : il s'agit de bobines de fil de cuivre placées soit sur le stator soit sur le rotor. Les bobinages fonctionnent comme des électro-aimants en générant un champ magnétique selon le sens du courant. Les trois enroulements du moteur BLDC de la figure 2 peuvent être câblés en série pour créer un moteur monophasé ou câblés individuellement pour obtenir un moteur triphasé.

Rotor : c'est la partie rotative du moteur. Dans un moteur à balais, l'énergie est transmise aux enroulements autour du rotor par les balais. Dans un moteur sans balais, les enroulements se trouvent sur le stator et le rotor est entouré d'aimants permanents. Il y a un petit entrefer entre le rotor et le stator.

Stator : c'est la partie fixe de la partie moteur du carter. La figure 2 montre les pôles magnétiques du stator d'un moteur à balais. Dans un moteur BLDC, le stator contient les enroulements non rotatifs.

Commutation : le fait d'alterner la direction du flux de courant dans un enroulement pour obtenir la rotation.

FCEM : ou force contre-électromotrice, c'est-à-dire l'énergie électrique créée dans un enroulement lorsqu'il traverse un champ magnétique. Dans un moteur BLDC, la FCEM provient des aimants permanents du rotor. La FCEM peut être utilisée pour détecter la position du rotor par rapport aux enroulements du stator et, par conséquent, pour entraîner la commutation.

La différence entre un PMSM et un moteur BLDC réside principalement dans la forme des enroulements de leur stator et, par conséquent, dans les caractéristiques de la forme d'onde de la FCEM créée (voir figure 3).

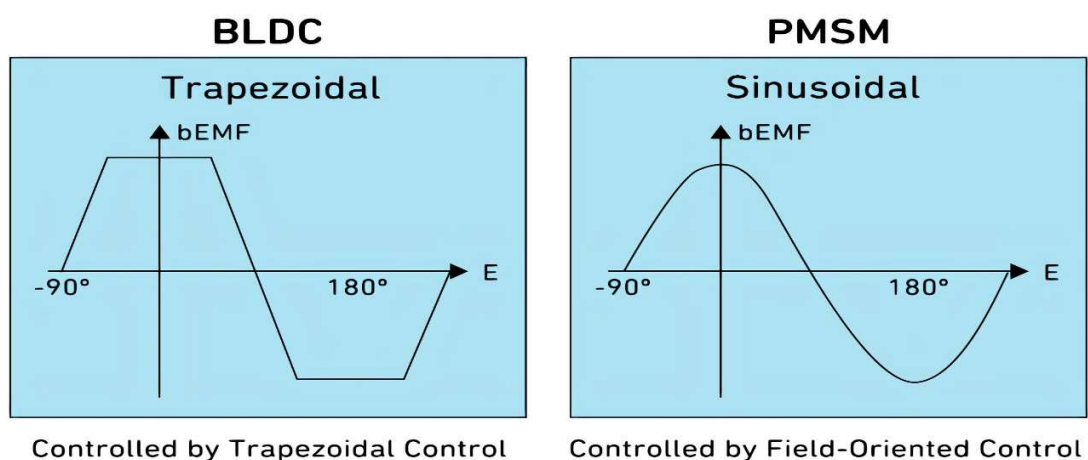


Figure 3 – Comparaison des formes d'onde de FCEM créées par les moteurs BLDC et PMSM (Source : Qorvo)

Algorithmes et capteurs d'entraînement de moteur

Pour créer la rotation dans un moteur BLDC ou un PMSM, il est nécessaire de procéder à une commutation où des signaux d'entraînement sont envoyés aux enroulements du stator. Les contrôleurs d'entraînement de moteur à base de semi-conducteurs – ou plus simplement les entraînements – créent des formes d'onde dont le nombre et la forme dépendent du type de moteur et du nombre de phases. Comme l'illustre la figure 3, un moteur BLDC correspond à une forme d'onde d'entraînement trapézoïdale et un PMSM à une forme d'onde sinusoïdale induite par la commande vectorielle (ou commande à flux orienté). Dans un PMSM triphasé, la commutation utilise trois formes d'onde sinusoïdales espacées de 120 degrés. Les moteurs BLDC peuvent eux aussi être entraînés par une forme d'onde sinusoïdale.

Que vous ayez recours à une commande vectorielle ou à un entraînement trapézoïdal, pour contrôler efficacement le rotor, il est nécessaire de connaître sa position précise par rapport aux enroulements du stator. Cela fournit une rétroaction essentielle à l'entraînement du moteur et permet de contrôler la vitesse et le couple du moteur. Les informations relatives à la position définissent la séquence, la synchronisation et la fréquence des signaux d'entraînement.

Il existe deux méthodes pour déterminer la position du rotor : avec ou sans capteurs.

Avec capteurs : des capteurs à effet Hall placés à côté de chaque enroulement du stator – représentés par les petits carrés bleus de la figure 2 – détectent les changements de polarité du champ magnétique (du N au S et du S au N) lorsque le rotor tourne. Un moteur triphasé requiert trois capteurs.

Sans capteurs : au lieu d'utiliser des capteurs, l'approche sans capteurs détermine la position du rotor à l'aide de la force contre-électromotrice.

Chacune de ces méthodes de détection a ses avantages et ses inconvénients. L'utilisation de capteurs à effet Hall augmente le coût total des composants et nécessite plus de temps d'assemblage. En revanche, les moteurs BLDC et les PMSM dotés de capteurs offrent un excellent couple, un mouvement de rotation fluide et un rendement élevé. Le contrôleur d'entraînement d'un PMSM a tendance à être plus complexe et l'utilisation d'une commande vectorielle requiert la présence de capteurs.

La méthode sans capteurs est la plus répandue pour les moteurs BLDC, ce qui permet de proposer des moteurs à prix attractif, mais implique par conséquent d'utiliser des algorithmes pour déterminer la position du rotor à partir de la force contre-électromotrice induite dans les enroulements du stator. Le principal défi technique que présentent les moteurs BLDC sans capteurs apparaît au démarrage. En effet, en l'absence de mouvement, il n'y a pas non plus de force contre-électromotrice, ce qui contraint à utiliser une autre méthode pour calculer la position du rotor. La solution la plus courante consiste alors à envoyer des signaux d'entraînement à haute fréquence à chaque enroulement de phase et c'est un algorithme qui s'occupe ensuite de calculer la position.

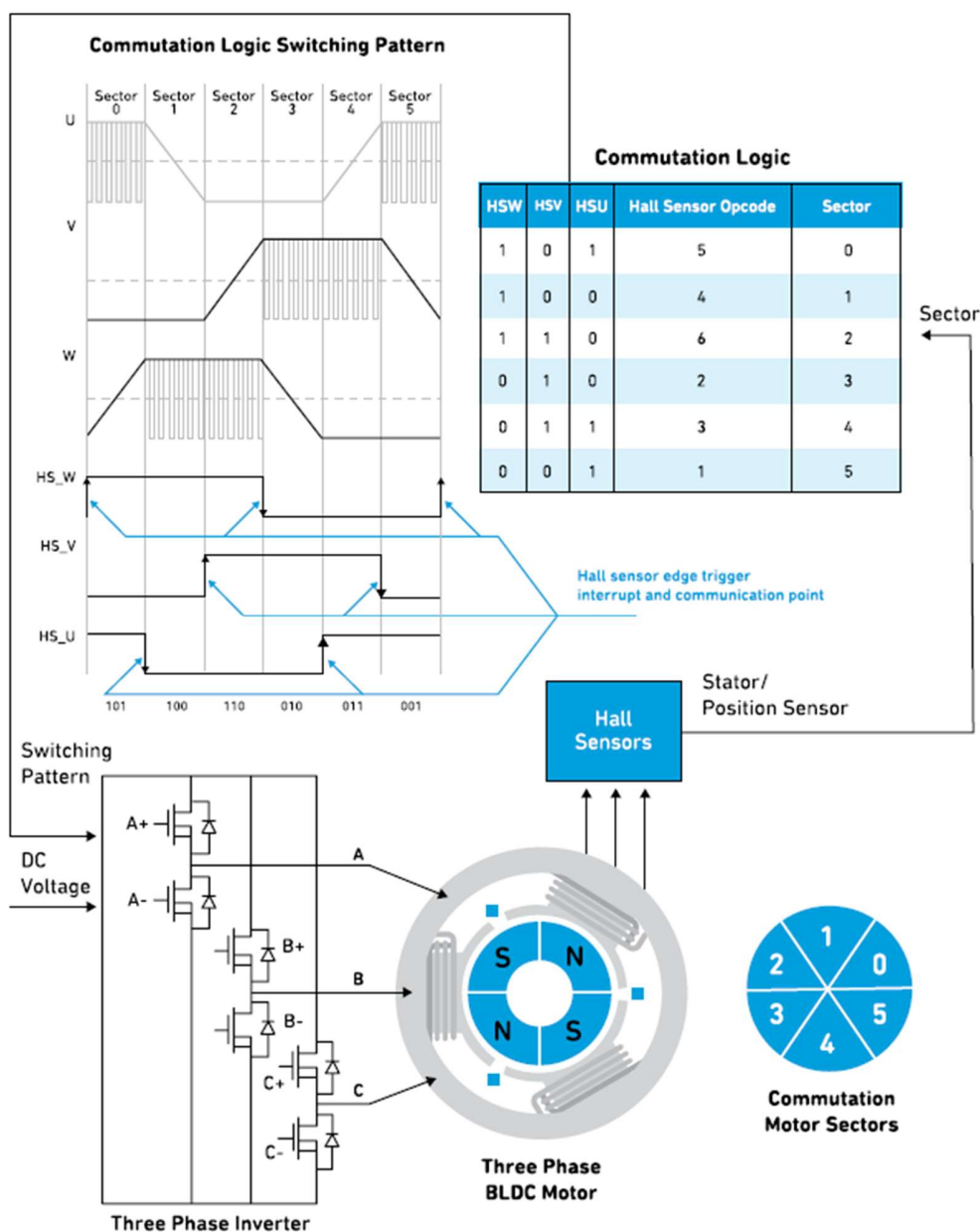


Figure 4 – Schéma simplifié d'un moteur BLDC triphasé utilisant des capteurs à effet Hall pour provoquer la commutation et lancer la séquence de l'onduleur (Source : Qorvo)

La figure 4 illustre une configuration simple de moteur BLDC triphasé utilisant des capteurs à effet Hall (HSW, HSV et HSU). Les capteurs sont pour l'essentiel des commutateurs numériques qui indiquent la polarité du champ magnétique détecté (1 pour le nord, 0 pour le sud). La sortie des trois capteurs est combinée afin d'obtenir un « opcode » logique numérique à 3 bits indiquant la position et la direction du rotor à mesure qu'elles varient. C'est sur la base de ces informations que sont constitués les signaux de commande envoyés à l'étage de l'onduleur à transistor de puissance triphasé. Dans des applications mettant en œuvre un moteur BLDC de puissance relativement faible, l'interface des capteurs, le contrôleur du moteur et les transistors de commande sont généralement intégrés dans un seul circuit intégré du contrôleur. Les moteurs à haute puissance prennent généralement la sortie de commande de grille du circuit intégré du contrôleur et utilisent des MOSFET de puissance à dissipateur thermique pour obtenir le courant de commande souhaité.

Pour varier la vitesse du moteur, une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de modifier le cycle de service (le rapport marche/arrêt des impulsions). Cette méthode a en plus l'avantage de limiter le courant nécessaire au démarrage du moteur.

Circuits intégrés de contrôle de moteur BLDC et ressources de développement

La figure 5 montre le schéma fonctionnel d'un entraînement de moteur BLDC triphasé sans capteur de faible puissance, [le DRV10963 de Texas Instruments](#). Ce circuit intégré intégrant trois MOSFET de puissance convient aux moteurs BLDC jusqu'à 5 V/0,5 A, utilisés notamment pour faire tourner les ventilateurs de refroidissement dans des ordinateurs portables et sur les processeurs hautes performances. Le DRV10963 offre une protection contre les courts-circuits et les surintensités grâce à sa fonction de surveillance du courant et de la tension de chaque MOSFET assurée par un convertisseur analogique-numérique (CAN) multiplexé. Une entrée MLI permet de régler la vitesse du moteur à la valeur souhaitée. L'entrée « FR » permet de changer le sens du moteur au démarrage, et la sortie « FG » fournit des informations sur la vitesse du moteur.

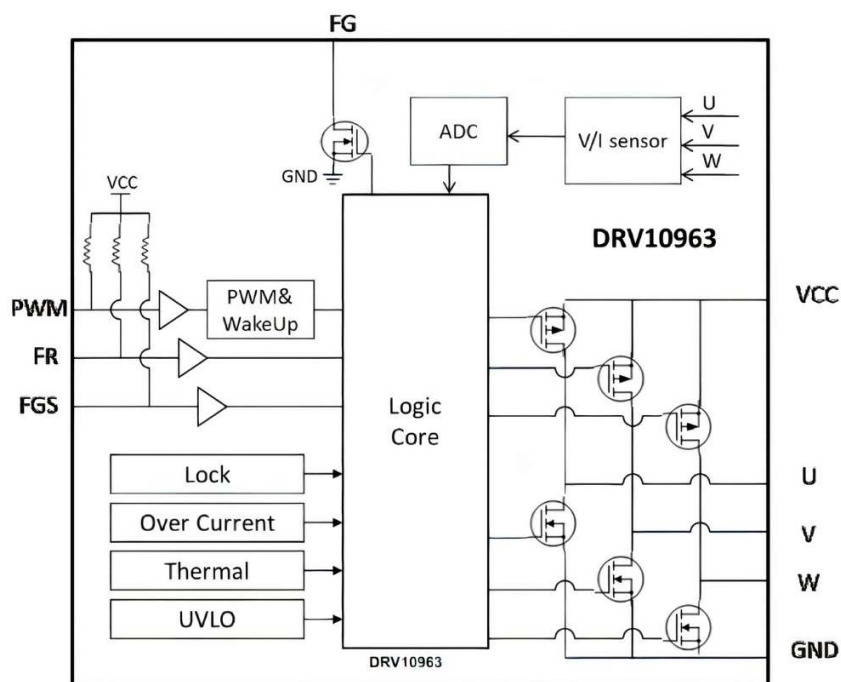


Figure 5 – Schéma fonctionnel de l'entraînement 5 V DRV10963 pour moteurs BLDC triphasés sans capteurs (Source : TI)

[Microchip](#) de son côté, propose une gamme complète d'entraînements monopuce pour moteurs BLDC et de circuits intégrés pour commandes de grille. Un exemple est le MCP8063, un entraînement pour moteurs triphasés à forme d'onde sinusoïdale sans capteurs et sans balais conçu pour les applications de pompes et de ventilateurs de refroidissement dans le secteur automobile.

Le contrôleur d'application de puissance [PAC5532 de Qorvo](#) convient à une large gamme d'applications grand public, industrielles et automobiles de commande de moteur à grande vitesse comme les outils électriques alimentés par batterie, les vélos électriques et les véhicules électriques hybrides légers. Le PAC5532 peut être utilisé avec des systèmes de 48 à 120 VCC. Il intègre un cœur Arm Cortex-M4F 32 bits cadencé à 150 MHz associé à des fonctions complètes et configurables de gestion de l'alimentation et de l'entraînement (voir **figure 6**).

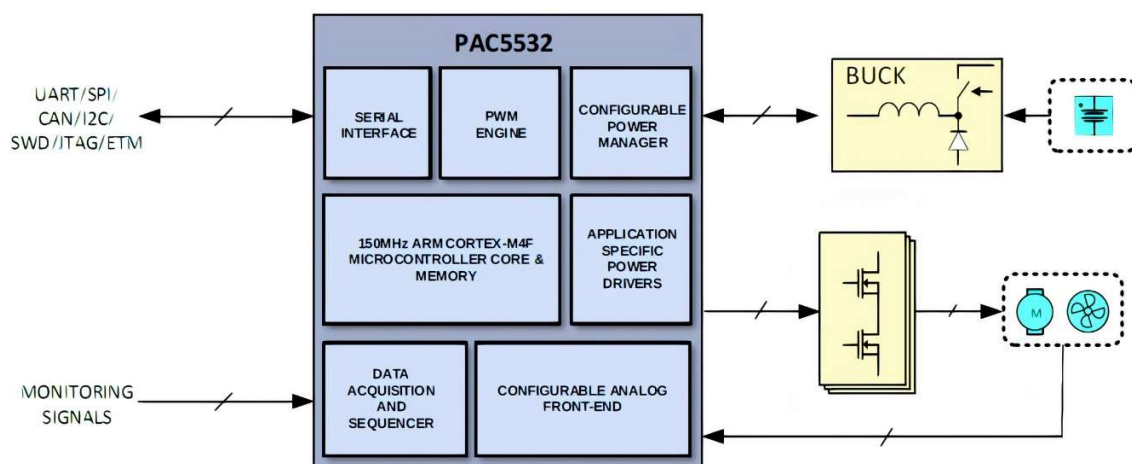
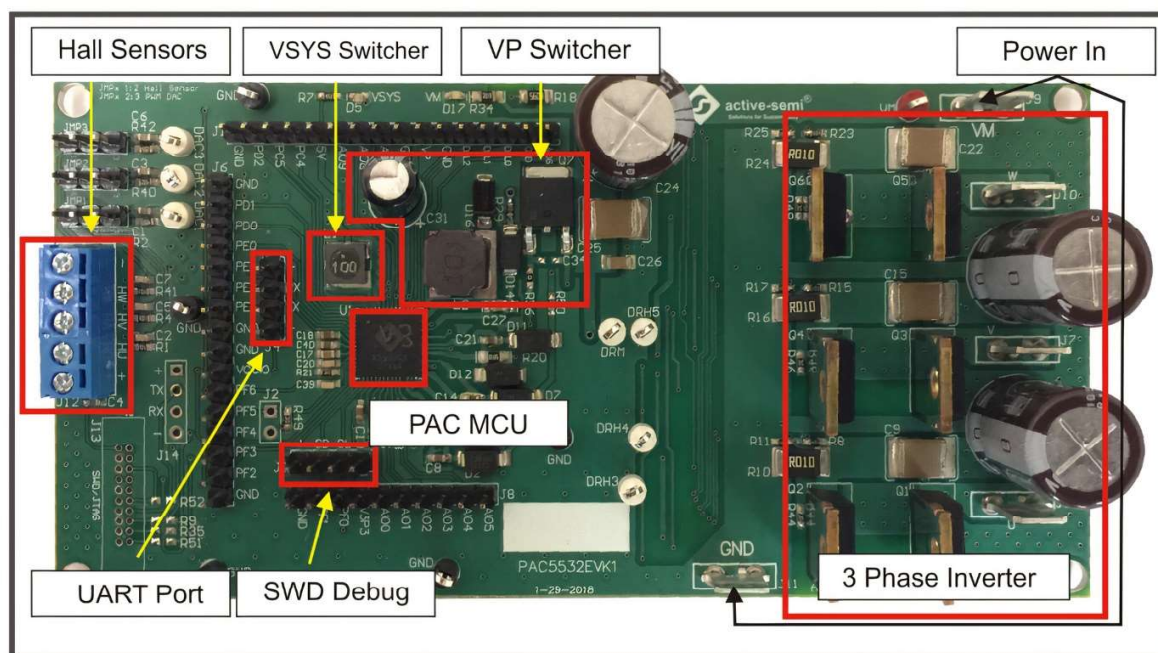


Figure 6 – Schéma fonctionnel d'application simplifié du PAC5532 de Qorvo dans des applications de commande de moteur alimentées par batterie (Source : Qorvo)

En complément du PAC5532, Qorvo a prévu le kit d'évaluation [PAC5532EVK1](#).



La figure 7 montre les principaux composants du kit d'évaluation comprenant le PAC5532 et les composants de l'onduleur triphasé à demi-pont en H. Un kit de développement logiciel à interface graphique est disponible en téléchargement sur le [site Web de Qorvo \(Source : Qorvo\)](#).

D'autres circuits intégrés de contrôle de moteur sont disponibles grâce à la série de microcontrôleurs hautes performances [RA6T2 de Renesas](#). Ces circuits intégrés intégrant un cœur Arm Cortex-M33 cadencé à 240 MHz comprennent un accélérateur matériel pour booster les algorithmes complexes de commande du moteur et exécuter des fonctions cryptographiques sécurisées. Les microcontrôleurs de la série sont assortis d'un ensemble complet de fonctions analogiques avec, entre autres, un convertisseur analogique-numérique (CAN) 12 bits, un convertisseur numérique-analogique (CNA) 12 bits, des amplificateurs à gain programmable et des comparateurs haute vitesse (voir **figure 8**).

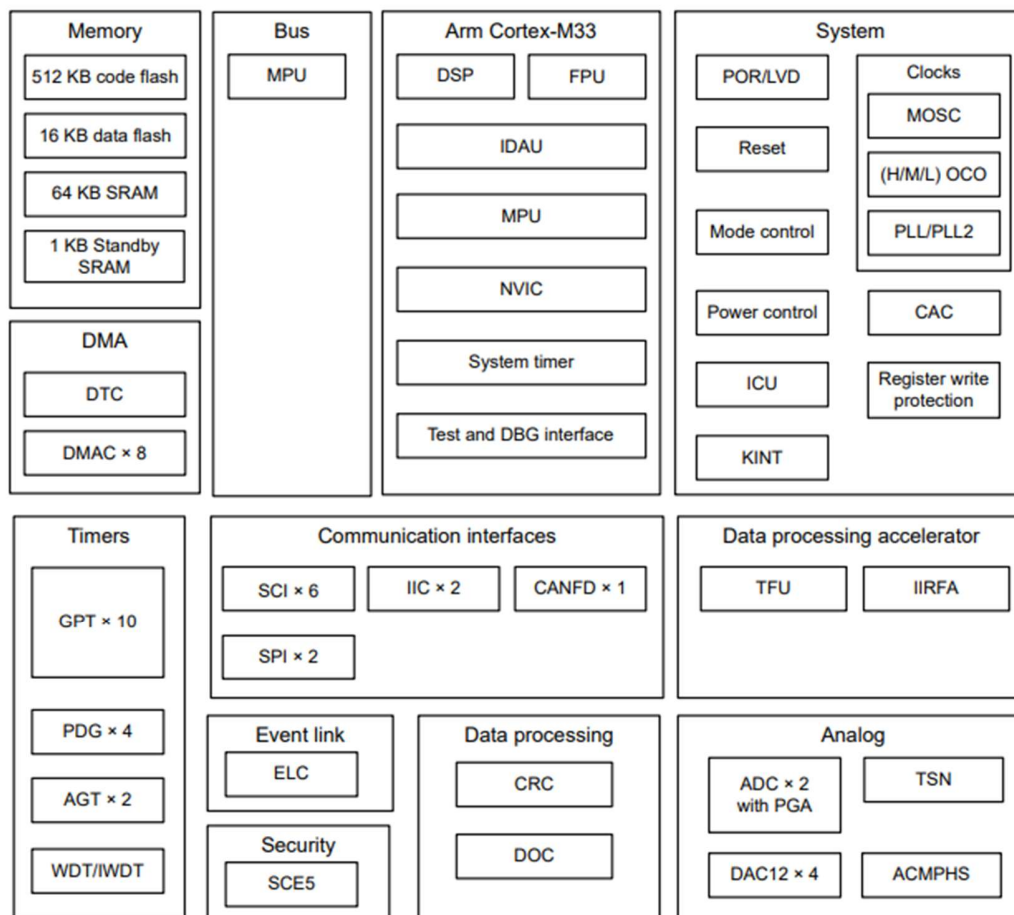


Figure 8 – Schéma fonctionnel du circuit intégré de contrôle de moteur basé sur le microcontrôleur RA6T2 de Renesas (Source : Renesas)

Le kit d'évaluation [MCK-RA6T2 de Renesas](#) est une solution pratique pour le prototypage d'une conception d'entraînement pour moteur sans balais. Il se compose de trois cartes de connexion (onduleur, microcontrôleur et communications), d'un petit moteur CC sans balais et de tous les câbles nécessaires. La **figure 9** montre l'architecture fonctionnelle du MCK-RA6T2.

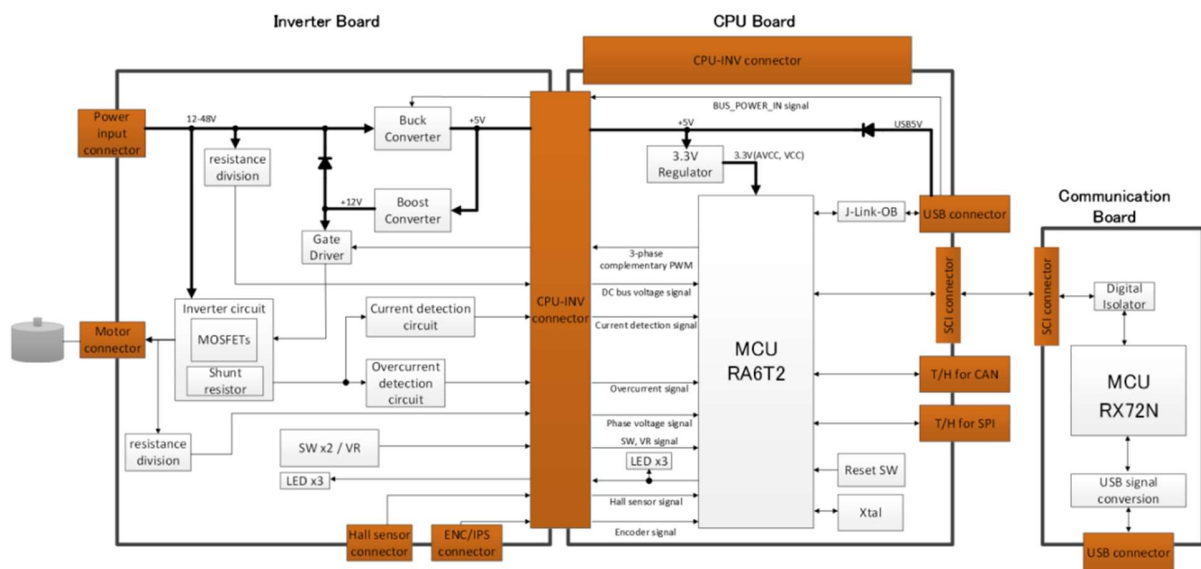


Figure 9 – Schéma fonctionnel du kit d'évaluation de moteur sans balais MCK-RA6T2 de Renesas
(Source : Renesas)

Se lancer dans le contrôle de moteurs BLDC

Dans cet article, nous avons pu étudier le fonctionnement des moteurs sans balais, comprendre ce qui fait leur succès et voir quelques cas d'utilisation. Les principales solutions à base de semi-conducteurs présentées dans la dernière partie offrent une approche pratique, bien documentée et fiable pour vous aider à démarrer avec votre première conception de moteur BLDC ou PMSM.

www.mouser.com