

commande de moteur

La commande des moteurs devient simple



Stuart Cording (Elektor)

Le moteur électrique se réinvente sans cesse en raison des nouvelles exigences des applications telles que jouets électroniques, appareils ménagers, outils et véhicules électriques. La commande électronique aussi, pour les mêmes raisons. L'intégration a joué un rôle clé pour obtenir des performances maximales des moteurs. Le pont en H intégré apparu après 1970 révolutionna l'électronique grand public, par ex. celle des magnétoscopes. Aujourd'hui, des microcontrôleurs (MCU) optimisés assurent l'efficacité des moteurs sans balais avec des commandes spécialisées.

Les petits moteurs CC à aimants permanents et balais sont omniprésents. Les plus répandus, les moteurs de moins d'un cheval (en anglais FHP = *fractional horsepower*), actionnent les équipements automobiles et les appareils ménagers. Au-delà des essuie-glaces et ventilateurs, les fonctions de confort des voitures font grimper le nombre de moteurs électriques présents : rétroviseurs électriques, lève-vitres, toits ouvrants, portes et sièges réglables. Même s'ils ne constituent pas l'option la plus efficace, les moteurs CC utilisés sont

simples à commander sur le plan électrique. Ils restent régulièrement utilisés, sauf dans les applications nécessitant un fonctionnement continu, par ex. pompes et ventilateurs, qui font appel aux moteurs sans balais, plus efficaces.

Commande des moteurs CC à balais

Les moteurs CC à aimants permanents simples ont un stator constitué d'un carter abritant en général deux aimants. Au centre, le rotor, monté sur un arbre, est un induit

comportant les enroulements. Ceux-ci sont reliés à un collecteur placé sur ledit arbre. Des balais de carbone, en général solidaires d'un capuchon fixé sur le carter du stator, transmettent l'énergie électrique aux enroulements (**fig. 1**). Le positionnement correct du collecteur sur l'arbre assure un rendement optimal. Idéalement, le plan collecteur-balai, ou plan de commutation, doit faire que le champ magnétique produit par les enroulements du rotor soit perpendiculaire à celui des aimants du stator. Or, en fonctionnement, ce plan se déplace à cause des déformations du champ magnétique du stator. Pour simplifier, on choisit le plan de commutation qui offre le meilleur rendement à un régime donné.

La commutation du moteur étant mécanique, seuls le sens et la vitesse de rotation peuvent être commandés électriquement. S'il n'y a besoin que du réglage de vitesse, il suffit d'un signal modulé en largeur d'impulsion (MLI) et d'un organe de puissance de dimension adéquate, tel qu'un MOSFET (**fig. 2**). La plupart des microcontrôleurs (MCU) comportent un bloc de temporisations qui, une fois configuré, peut produire un signal MLI sans gestion du processeur. Mieux vaut aussi utiliser un interrupteur MOSFET à canal N monté côté masse, car dans les applications à faible consommation, la grille peut souvent être pilotée directement. S'il faut une commutation côté +Vcc, avec un MOSFET à canal N, il faut un circuit auxiliaire pour piloter la grille du MOSFET [1].

Commande du régime et du sens de rotation

Pour asservir le régime, la boucle de commande a besoin du régime instantané

de l'arbre moteur. Une approche consiste à utiliser un capteur, par ex. optique, associé à une roue à fentes solidaire du rotor. Pour un système de commande numérique, la période du signal du détecteur optique peut être convertie en régime moteur (tr/mn). Les MCU disposent en général d'un bloc d'entrées pour capturer des temps sur les fronts montants ou descendants d'un signal. Leur résolution dépend de la vitesse d'horloge du bloc et doit être assez grande pour fournir des données compatibles avec le régime maximal. La sortie de ce bloc alimente un algorithme proportionnel-intégral-dérivé (PID) [2] qui commande le rapport cyclique de la MLI pour maintenir le moteur à la consigne de vitesse (fig. 3).

Toutefois, de tels capteurs montés sur le rotor sont souvent trop coûteux pour l'application, mais on peut aussi utiliser la force contre-électromotrice (FCEM) du moteur : proportionnelle au régime, sa précision est plus que suffisante dans la plupart des cas. Pendant les coupures de la commande MLI, on peut mesurer la FCEM directement aux bornes du moteur. Cette méthode est très économique dès lors que le MCU est équipé d'un convertisseur analogique-numérique (CA/N). Cette approche ne nécessite en pratique que quelques résistances pour réduire la tension à la plage d'entrée du CA/N. L'implémentation logicielle est plus complexe. La mesure du CA/N et la coupure du MOSFET doivent être synchrones et il faut allouer un court délai de stabilisation de la tension (fig. 4). Pour les MCU conçus pour la commande de moteurs, il y aura en général la possibilité d'établir un lien matériel entre la sortie MLI et le déclenchement du CA/N, ainsi qu'un bloc de retard permettant d'automatiser cette approche de mesure.

Une fois les éléments de commande du régime du moteur établis, il ne reste plus qu'à gérer le sens de rotation. Le pont en H (fig. 5) utilise quatre N-MOSFET de puissance permettant d'inverser la polarité de l'alimentation des bornes du moteur (soit Q2 et Q3, soit Q1 et Q4). En court-circuitant les bornes du moteur par la paire MOSFET supérieure ou inférieure, on forme un frein électrique qui ralentit le rotor. Là



Figure 1. Les composants d'un moteur CC de moins d'un cheval. Le collecteur est bien visible sur le rotor, près des bobines de l'induit. (Source : ShutterStock/Pixel Enforcer)

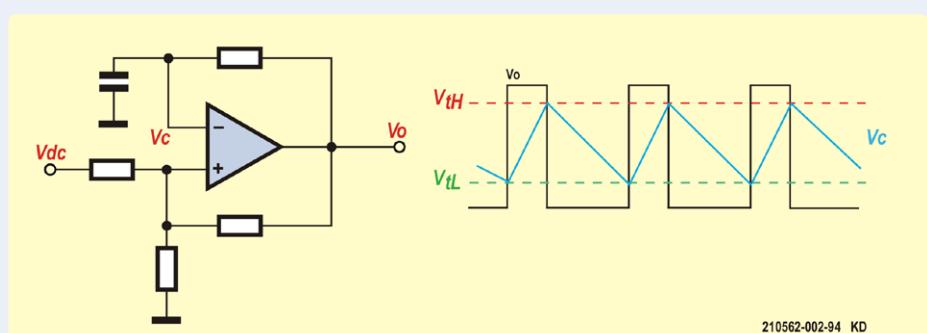


Figure 2. Générateur MLI basé sur un ampli opérationnel.

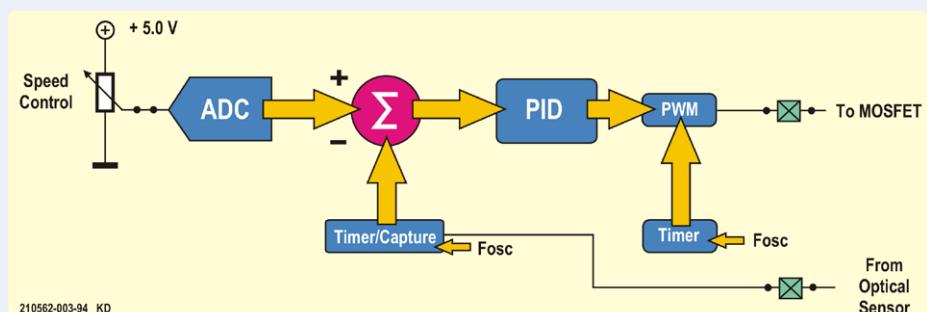


Figure 3. La capture de données temporelles est possible en sortie d'un capteur solidaire du rotor. Combinées avec la consigne de vitesse, elles sont transmises au PID pour réguler le régime moteur. (Source : Microchip Technology)

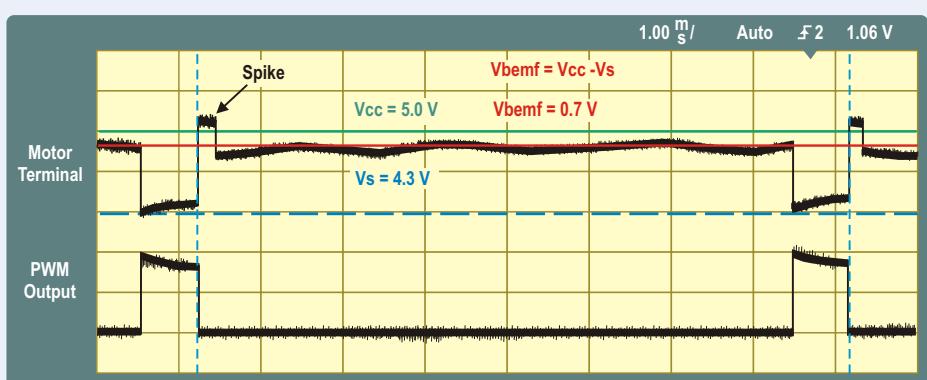


Figure 4. Après la coupure du MOSFET, un petit pic apparaît aux bornes du moteur. Les mesures du CA/N doivent attendre que la FCEM ait atteint un état stable. (Source : Precision Microdrives)

encore, une MLI sur l'un des MOSFET (ou les deux) pourra asservir la vitesse. Il faut toutefois noter qu'il existe un risque de court-circuit de l'alimentation en engageant les deux MOSFET simultanément.

La plupart des fournisseurs de circuits intégrés (CI) proposent des ponts en H à haute intégration, simples d'utilisation avec une multitude de fonctions de protection et de diagnostic. Par ex. l'IFX9201SG [3] d'Infineon qui, avec un courant de 6 A, vise la commande de moteurs en milieu industriel. Ce CI s'interface à des E/S à usage général et à un signal MLI, afin de commander la vitesse et le sens de rotation. En parallèle, une interface SPI offre l'accès aux registres de diagnostic. Ceux-ci

renvoient les données de courts-circuits par rapport à V_{cc} et à la masse, les conditions de charge ouverte et les sous-alimentations. Au besoin, la vitesse et le sens de rotation peuvent se piloter par SPI plutôt que par les broches d'entrée de sens et de MLI. Le risque de court-circuit involontaire du pont en H est ainsi éliminé, et cela inclut des protections supplémentaires contre la surchauffe et la surintensité. Pour prototyper rapidement une étude, vous pouvez acquérir le kit H-Bridge 2GO [4] qui s'intègre à DAVE, l'environnement de développement logiciel d'Infineon.

Optimisation du régulateur PID

La sélection d'un MCU répondant au niveau de prix souhaité pour l'application aboutit

souvent à un MCU à 8 bits. L'inconvénient de ces MCU réside dans leurs piétres performances arithmétiques. En conséquence, un régulateur PID aura du mal à suivre la cadence des changements de consignes de vitesse et des variations de charge. Pour pallier cet écueil, certains MCU PIC intègrent un bloc accélérateur PID (fig. 6) à accumulateur à 35 bits, comme le PIC16F1619 de Microchip. Grâce à l'équation standard du domaine s (fréquence complexe) du PID, on écrit trois constantes (K₁, K₂ et K₃) dans les registres du module puis le point de consigne souhaité et on lance le module de calcul PID. Le module PID réduit à 9 le nombre de cycles d'horloge requis, contre 1000 environ pour un PID logiciel sur ledit MCU [5].

Avantages des moteurs BLDC et PMSM

Si la simplicité des moteurs CC FHP est attrayante, d'autres caractéristiques, comme l'efficacité, les nuisances sonores et la densité de puissance accrue, orientent de plus en plus les applications vers les moteurs CC sans balais (BrushLess DC = BLDC) et synchrones à aimants permanents (Permanent Magnet Synchronous Motors = PMSM). Avec un pilotage optimal, les BLDC et les PMSM sont bien plus efficaces et dissiper la chaleur est plus facile, car les enroulements sont dans le stator.

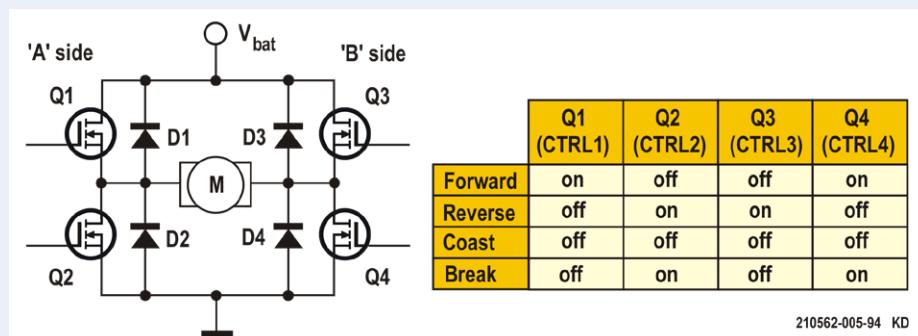
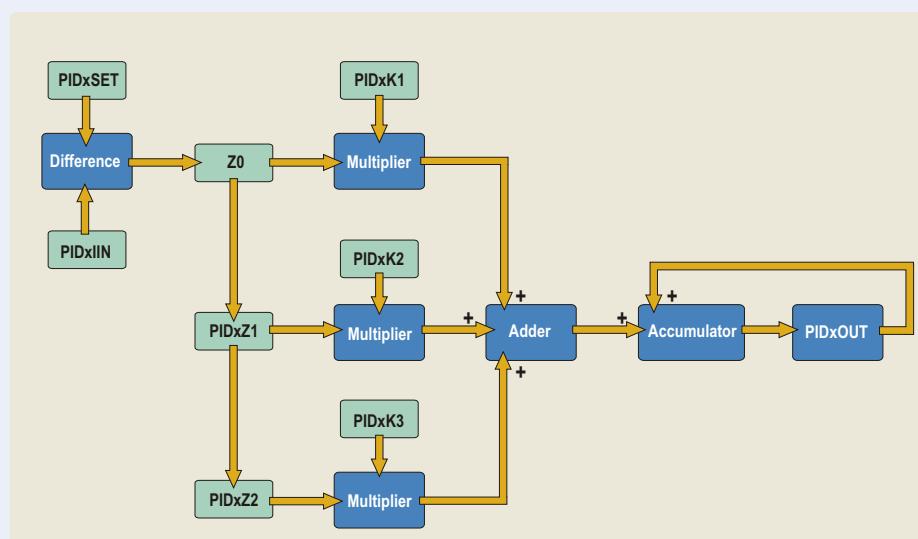


Figure 5. Circuit de pont en H avec tableau décrivant comment la commutation commande le sens de rotation. En court-circuitant les bornes du moteur, on peut mettre en œuvre un frein électrique. (Source : Microchip Technology)



$$\begin{aligned}
 K1 &= K_p + K_i T + \frac{K_d}{T} \\
 K2 &= -K_p - \frac{2K_d}{T} \\
 K3 &= \frac{K_d}{T}
 \end{aligned}$$

210523-006-94 KD

Figure 6. Bloc PID du PIC16F1619 et équations permettant de calculer les trois constantes standard utilisées. (Source : Microchip Technology)

Un moteur BLDC ou PMSM peut être vu comme un CC FHP mécaniquement inversé. Les bobines pilotées en commutation sont enroulées sur le stator (le carter fixe), tandis que l'aimant garnit la paroi du rotor. Le rotor est plus léger avec une faible inertie. La commutation n'est plus mécanique, à charge pour l'ingénieur de concevoir un pilotage électronique. La principale différence entre ces deux types est que les BLDC produisent une FCEM trapézoïdale et sont moins exigeants sur la commutation que les moteurs PMSM qui exigent une commutation sinusoïdale et produisent une FCEM sinusoïdale. Les moteurs PMSM sont également plus silencieux.

En général, les enroulements sont câblés en étoile. Cela implique six demi-ponts pour alimenter les trois bobines d'un moteur BLDC selon un schéma en six étapes qui applique la puissance à deux des trois (fig. 7). Le champ magnétique résultant tourne autour du stator, et produit dans le rotor le couple mécanique souhaité qui l'entraîne. En inversant l'ordre de la séquence de commutation, le rotor change de sens. Bien que ce schéma de principe simple du BLDC rende son fonctionnement clair, en pratique, les bobines sont en général disposées de sorte qu'il faut plusieurs rotations électriques pour obtenir un tour mécanique complet.

Détermination sans capteur de l'angle du rotor

Le défi suivant est de déterminer la position du rotor pour s'assurer que la commutation suivante est lancée au bon moment. Les moteurs BLDC embarquent souvent des capteurs à effet Hall qui donnent l'angle du rotor avec la précision requise. Les fronts montants et descendants fournis déclenchent des interruptions logicielles du MCU, ce qui permet une mise en œuvre simple du pilotage correct des bobines du moteur par des routines d'interruption. Un compteur périodique peut aussi capturer ces signaux pour déterminer la vitesse alors renvoyée sur le contrôleur PID. La vitesse du moteur est également commandée par des signaux MLI. Ainsi, bien que la commutation de ces moteurs repose

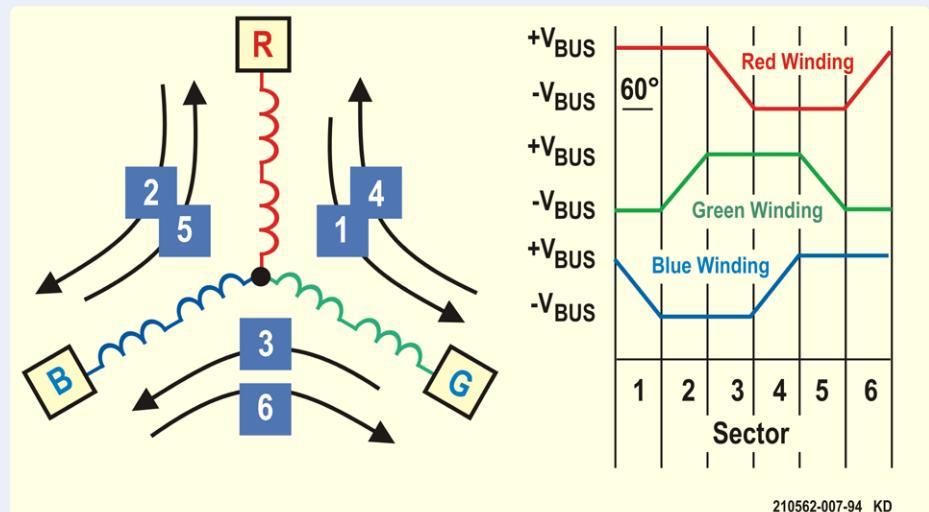


Figure 7. Moteur BLDC avec bobines en étoile et étapes de commutation induisant une rotation électrique élémentaire. La rotation mécanique peut nécessiter plusieurs rotations électriques. (Source : Microchip Technology)

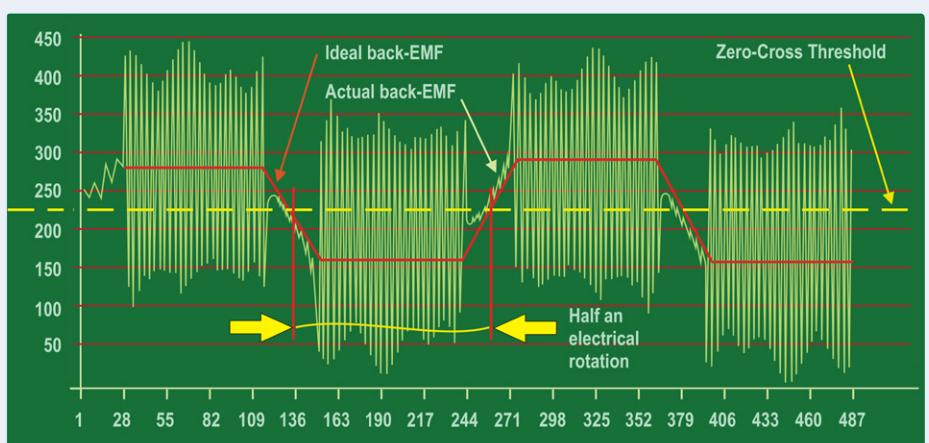


Figure 8. La FCEM de la phase ouverte peut être mesurée et utilisée pour déterminer la rotation angulaire et éviter ainsi l'utilisation d'un capteur à effet Hall. (Source : Microchip Technology)

sur le savoir-faire de l'ingénieur d'étude, l'approche n'est pas si différente de celle des moteurs CC à balais.

Mais comme déjà mentionné, les capteurs grèvent le coût et parfois il n'y a tout simplement pas de place pour les accueillir. Comme les moteurs CC à balais, les BLDC produisent une FCEM. Et c'est un fait, dans ces moteurs, ce signal peut servir à déterminer la position du rotor. Lorsque la FCEM de la phase non alimentée passe

théoriquement par zéro (à la moitié de la tension alternative d'alimentation), l'angle du rotor peut être déterminé en mesurant la période de ces passages (fig. 8).

La théorie semble simple, mais la mise en œuvre reste particulièrement difficile. Tout d'abord, à l'arrêt, il n'y a pas de FCEM, ce qui oblige à faire tourner le moteur à une vitesse telle qu'un algorithme dispose d'un signal de FCEM suffisant pour être mesuré. Ensuite, le code requis pour évaluer les

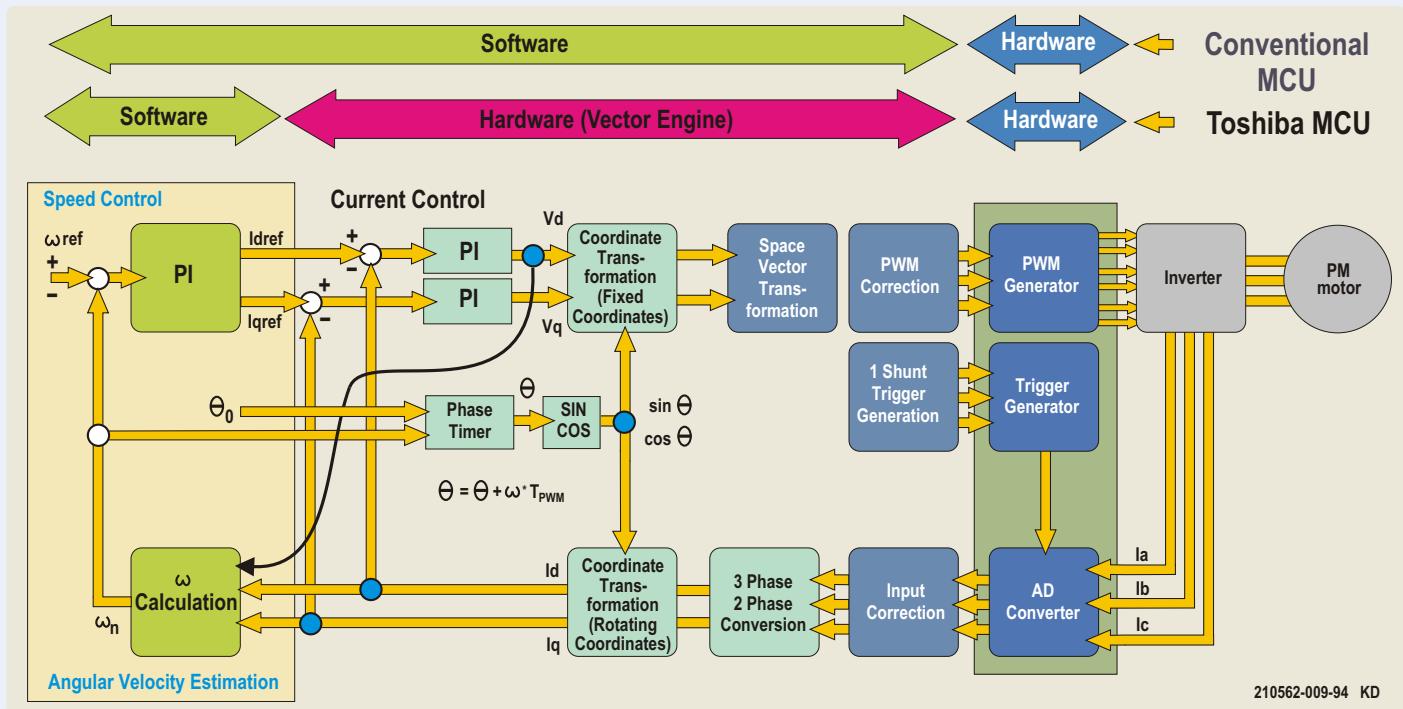


Figure 9. Les modules à haute intégration comme l'Advanced Vector Engine Plus de Toshiba, permettent une commande quasi autonome des moteurs à aimant permanent. (Source : Toshiba Electronics Europe)

données de FCEM et les filtrer peut demander un temps d'exécution long. Cela peut impliquer de passer d'une stratégie de commutation à une autre lorsque le moteur change de régime de fonctionnement. Les fournisseurs de commandes de moteurs BLDC élaborées ont résolu bon nombre de ces problèmes, permettant de caractériser quasi automatiquement un moteur inconnu et d'en faire l'apprentissage en le reliant à une commande.

Mise en œuvre d'une commande sinusoïdale de moteur

L'algorithme de commande PMSM a un niveau supplémentaire de complexité. Il exige que les signaux MLI du MCU soient modulés en continu pour produire une sinusoïde d'alimentation des enroulements du moteur. Une telle commande visant le champ (Field oriented control = FOC) utilise le courant des enroulements triphasés pour déterminer l'angle instantané du rotor. Exploitant les transformées de Clarke/Park, ce procédé de commande tend à maintenir l'orthogonalité des champs magnétiques du rotor et du stator afin d'obtenir un couple maximal à tout moment.



Face à cette complexité, les leaders de la commande de moteurs tentent de simplifier leurs produits afin que les ingénieurs s'efforcent de développer les caractéristiques avantageuses de leurs applications.

Bien qu'une telle complexité puisse être confiée au logiciel sur certains MCU, de nombreux fabricants ont opté pour des modules matériels qui en automatisent une grande partie. Les MCU TXZ4A+ de Toshiba sont un exemple de ces modules [6].

Ces MCU Arm® Cortex®-M4 comportent un module Advanced Vector Engine Plus (A-VE+) étroitement couplé aux modules MLI et CA/N (fig. 9). Dans les modules A-VE, les transformées de Clarke/Park complètes, de triphasé vers diphasé et inversement, sont mises en œuvre dans le matériel ne nécessitant qu'un régulateur PI, une estimation logicielle de la vitesse angulaire et un peu de gestion interne. En dehors de cela, les modules fonctionnent ensemble en quasi-autonomie.

Innover dans la commande des moteurs

Face à cette complexité, les leaders de la commande de moteurs s'essaient à simplifier leurs solutions afin que les développeurs se concentrent sur les caractéristiques avantageuses de leurs applications. Selon Jonas P. Proeger, directeur commercial chez Trinamic, aujourd'hui dans le giron d'Analog Devices (fig. 10), les principaux thèmes abordés concernent l'amélioration de l'efficacité, la réduction du bruit et l'ajout d'intelligence. Une meilleure efficacité est nécessaire pour le nombre croissant de véhicules autonomes



Figure 10. Jonas P. Proeger, directeur de la gestion commerciale chez Trinamic, aujourd'hui filiale d'Analog Devices. (Source : Analog Devices)

sur batterie, par ex. en logistique, les robots autonomes mobiles (AMR). Les moteurs utilisés changent, les densités de puissance plus élevées et les économies de poids se traduisent par des moteurs d'inductance plus faible. En conséquence, les algorithmes et boucles de commande doivent changer et fonctionner jusqu'à 100 kHz. Des CI tels que le TMC4671 [7] y parviennent en utilisant un matériel spécifique, avec des approches alternatives à base de DSP ou de FPGA.

Le silence de fonctionnement est une autre exigence croissante pour une perception de meilleure qualité que les produits alternatifs à moteurs et réducteurs bruyants. Jonas présente ici sa technique *stealthChop* qui utilise une méthode de hachage contrôlée en tension qui peut réduire le bruit audible de 10 dB pour un moteur pas-à-pas

210562-04

bipolaire [8]. La réduction du courant d'ondulation résiduel diminue l'énergie dissipée par le moteur. Les moteurs intelligents sont le domaine ultime de croissance, là où les industries ont besoin de moteurs « auto-conscients ». Ces moteurs développent une intelligence artificielle (IA) croissante dans les systèmes en fournissant des données en temps réel depuis les ateliers.

Sans contrôle, le pouvoir n'est rien

L'idée que les moteurs BLDC et PMSM deviennent prépondérants est erronée. Il existe toujours de nombreuses applications adaptées aux moteurs CC FHP classiques. Et, avec le grand nombre de ponts en H et MCU d'entrée de gamme dotés de périphériques intelligents, il est clair que l'industrie des semi-conducteurs a encore beaucoup à dire. Toutefois, comme les applications passent en mode batterie, exigent des rendements toujours plus élevés ou un fonctionnement silencieux, les ingénieurs se tourneront vers les moteurs BLDC et PMSM. Bien que beaucoup de techniques de commande des moteurs CC soient toujours exploitées, de nombreux pièges retardent l'utilisation fine et la mise en œuvre des contrôleurs. Une base théorique solide reste utile et permet de déboguer les commandes de moteur. Toutefois, pour gagner du temps, il est utile de s'appuyer sur l'expérience d'experts de ce domaine dynamique et d'envisager les CI à haute intégration du marché. ▶

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (stuart.cording@elektor.com).

Contributeurs

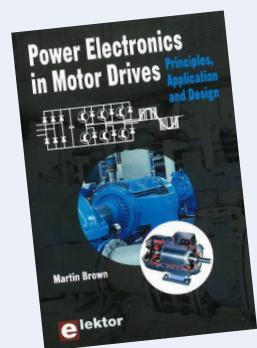
Conception et texte : **Stuart Cording**

Rédaction : **C. J. Abate**

Illustrations : **Patrick Wielders**

Mise en page : **Harmen Heida**

Traduction : **Yves Georges**



PRODUITS

▶ **E-book en anglais, « Power Electronics in Motor Drives »**
www.elektor.fr/18517

LIENS (tous en anglais)

- [1] C. Valens, « How to Choose Between High-side and Low-side Switching » (Comment choisir entre commutation côté Vcc et côté masse), Elektor, 08/2019 : <https://bit.ly/3H38uA5>
- [2] Vidéo, « Understanding PID Control, Part 1: What Is PID Control? », The MathWorks Inc., 05/2018 : <https://bit.ly/3CZfc0r>
- [3] Page du IFX9201SG, Infineon : <https://bit.ly/3CZFEmD>
- [4] Page du kit pont en H, 2GO, Infineon : <https://bit.ly/3ww91FZ>
- [5] D. Hou, « PID Control on PIC16F161X by using a PID Peripheral », Microchip Technology Inc., 2015 : <https://bit.ly/3DbGCHy>
- [6] MCU de la série TXZ4A+, Toshiba : <https://bit.ly/3bXUSId>
- [7] Page du TMC4671, Trinamic : <https://bit.ly/3bWO2CA>
- [8] B. Dwersteg, « Performance stealthChop (qualitative) », TRINAMIC Motion Control GmbH & Co. KG, 02/2018 : <https://bit.ly/3CZgxvt>