Des microcontrôleurs sophistiqués simplifient la conception des contrôles moteurs pour les véhicules électriques et hybrides

Maik Strietzel, Application Engineer, Automotive Business Unit
Fujitsu Semiconductor Europe

Les constructeurs automobiles et leurs fournisseurs s'efforcent aujourd'hui de développer de nouveaux modèles de véhicules économiques dans le but de réduire la consommation de carburant et les émissions de CO_2. Les véhicules hybrides en tout genre servent actuellement de passerelle technologique en attendant que des systèmes de stockage de l'énergie électrique de haute capacité soient disponibles à des prix raisonnables, permettant ainsi la production de véhicules tout électriques à longue autonomie. Etant donné que l'électrification des véhicules motorisés connaît une avancée rapide, il est encore plus important de garantir un contrôle efficace des moteurs électriques.

Les véhicules hybrides électriques et les véhicules électriques (VHE/VE) offrent réellement la possibilité de réaliser les réductions d'émissions de gaz à effet de serre imposées par les législateurs. Le gain en CO_2 que permet, par exemple, un véhicule hybride électrique est de quelque 30%. D'autres mesures, telles que la servodirection électrique, permettent une économie ultérieure de 5%. Dans ces deux approches technologiques, l'élément central est le moteur électrique qui, au niveau du groupe motopropulseur, est utilisé soit en combinaison avec un moteur conventionnel à combustion interne (dans les voitures hybrides), soit comme source d'alimentation indépendante (dans les véhicules tout électriques).

Dans le choix du type de moteur, les critères envisagés sont les dimensions, le poids, la fiabilité/robustesse, le couple requis et l'efficacité. Tant les moteurs synchrones qu'asynchrones peuvent être utilisés, le premier étant un moteur synchrone à aimant permanent (PMSM) caractérisé par un couple élevé, des dimensions compactes et une haute efficacité (94% environ). Toutefois, malgré les avantages offerts, ce type de moteur sera pénalisé par un prix plus élevé étant donné que des matériaux onéreux provenant d'éléments terrestres rares sont généralement nécessaires pour les aimants permanents.

Aujourd'hui, les efforts portent sur l'utilisation des moteurs asynchrones. Ceux-ci sont en effet solides et abordables (ils ne nécessitent pas d'aimants provenant d'éléments rares) et les propriétés dynamiques peuvent être facilement contrôlées par l'utilisation d'algorithmes logiciels adaptés. Les inconvénients de ce type de moteur sont une efficacité légèrement inférieure (90% environ), un poids plus élevé et un couple plus faible lors de la phase de démarrage. Non seulement ces moteurs ne nécessitent pas de maintenance mais, grâce aux versions sans balais disponibles d'ailleurs pour ces deux types de moteur, les pertes liées aux balais ne sont plus un problème.

Les PMSM affichent un meilleur rapport dimensions/couple et une plus grande efficacité. Ils sont actuellement la solution privilégiée pour les groupes motopropulseurs des véhicules électriques et des véhicules hybrides électriques.

Contrôle

Les moteurs sans balais exigent plus d'effort au niveau de la commutation. En outre, un contrôle sûr et efficace est un pré-requis fondamental lors de l'utilisation dans les groupes motopropulseurs. Le défi consiste à trouver le parfait équilibre entre le moteur, l'électronique de puissance, l'unité de contrôle (le microcontrôleur) et le logiciel de contrôle.

Les algorithmes utilisés doivent être adaptés aux moteurs et applications respectifs de sorte que la commande électronique puisse commuter le moteur de manière optimale à tout moment. Une adaptation incorrecte de ces algorithmes peut entraîner des effets non désirés tels qu'un fonctionnement irrégulier ou un bruit excessif, qui ensemble ont une incidence négative sur le degré d'efficacité attendu.

Le contrôle moteur combine divers algorithmes de contrôle en fonction de l'application. La Figure 1 illustre une commande à orientation de champ (FOC) combinée à des systèmes de régulation PID pour le contrôle de la vitesse du rotor, du couple et du flux.

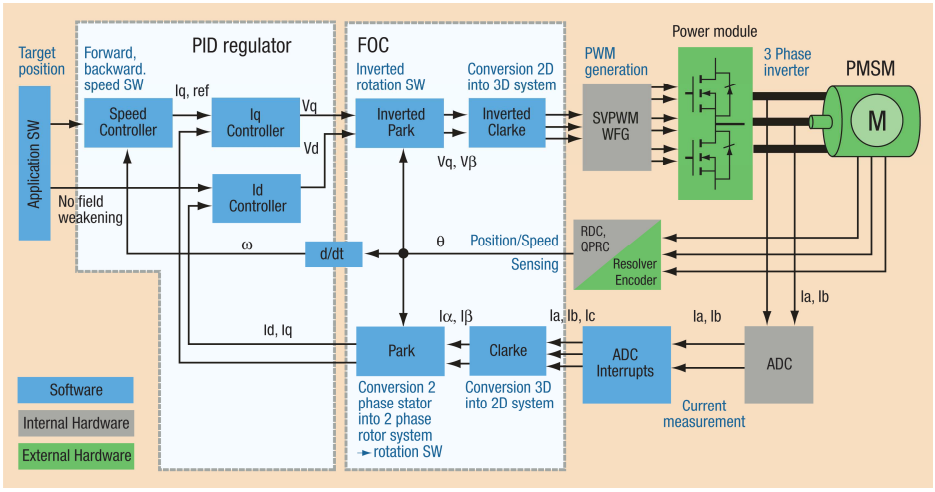


Figure 1: Contrôle moteur selon le principe de Clarke/Park

Dans la commande FOC, la transformation de Clarke/Park est utilisée pour transformer les courants de phase mesurés (au moins deux doivent être mesurés en permanence) en passant d'un système tridimensionnel avec stator vers un système bidimensionnel avec rotor. Ces variables transformées, la position actuelle du rotor et la position cible spécifiée par l'application, ou une vitesse de rotation cible, sont prises comme points de départ pour les algorithmes de contrôle. Etant donné leurs caractéristiques de régulation rapide, précise et sans dépassement, les régulateurs PID sont la solution idéale quand il s'agit de stabiliser l'état de systèmes complexes.

Avec la transformation inverse de Park/Clarke, le système est à nouveau converti en un système vectoriel avec rotor et les tensions à définir sont transmises au moteur via l'électronique de puissance par le biais d'une modulation d'impulsions en largeur.

La position actuelle du rotor peut être, soit déterminée directement avec un capteur, soit estimée en utilisant un système de calcul complexe. Cette dernière méthode – également connue sous le nom de détection angulaire sans capteur – repose sur l'enregistrement et l'évaluation de deux phases contrôlées de manière active. Cette méthode peut donner des différences de plusieurs degrés et n'est pas utilisée aujourd'hui dans les applications pour véhicules motorisés.

La détection de la position du rotor avec capteur peut être réalisée au moyen de plusieurs systèmes de capteur. La section suivante donne un bref aperçu des types de capteur les plus courants. Toutefois, on peut affirmer de manière générale que la détection de la position du rotor est indispensable pour un contrôle précis du moteur. En tant qu'élément essentiel, le capteur de position du rotor a une influence considérable sur les performances et l'efficacité du système moteur.

Capteurs Hall

Les capteurs Hall reposent sur l'Effet de Hall, selon lequel une tension est générée en modifiant le champ magnétique autour d'un conducteur traversé par du courant. A l'aide d'un anneau magnétique fixé au rotor et d'un capteur attaché au stator, le capteur à effet Hall est une solution économique et simple pour la détection angulaire. Plus le nombre de pôles magnétiques et d'éléments Hall sera élevé, plus grandes seront la résolution et la précision. Toutefois, ce capteur peut être sensible à des interférences magnétiques.

Codeur incrémental

L'un des capteurs fréquemment utilisés est le codeur incrémental. Il se décline en de nombreuses versions et utilise un balayage mécanique et optique afin de déterminer la position angulaire actuelle. Pour mesurer un angle, un codeur incrémental doit être placé sur une position zéro ou de référence. Pour le microcontrôleur (MCU), l'évaluation de l'angle consiste en fait à détecter le sens de rotation et à compter les impulsions générées. L'écart angulaire peut se calculer en mesurant simplement les intervalles entre deux impulsions. L'insensibilité aux interférences magnétiques est ici un avantage. Par contre, les pertes éventuelles dues à la friction mécanique et la sensibilité à la poussière dans le cas de systèmes optiques sont des inconvénients.

Résolveur

Un capteur très solide, souvent utilisé dans l'industrie automobile, est le résolveur, qui est insensible aux interférences magnétiques et à la poussière et qui n'est pas sujet à des pertes éventuelles dues à la friction au cours de la détection angulaire. Le résolveur se compose du rotor, fixé en permanence à l'arbre du moteur (= rotor du moteur), et du stator en forme d'anneau, attaché en permanence à la carcasse du moteur. Le stator comprend au moins une bobine d'excitation et deux bobines captrices. Des résolutions plus élevées peuvent être obtenues en augmentant le nombre de paires de pôles.

La Figure 2 montre le schéma d'un résolveur. La bobine d'excitation est alimentée par un signal analogique sinusoïdal. Le signal analogique est transmis aux deux bobines captrices, décalées de 90°, via l'accouplement magnétique (induction). L'évaluation des signaux analogiques sinusoïdaux et cosinusoïdaux rendus par le résolveur nécessite un convertisseur résolveur-numérique (RDC), utilisé pour déterminer la position et l'écart angulaires à partir des données analogiques.

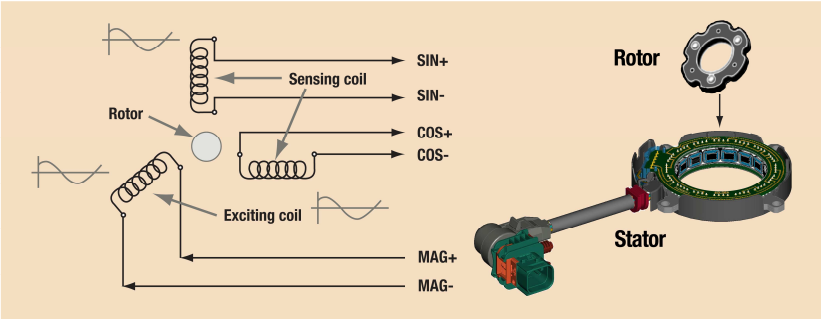


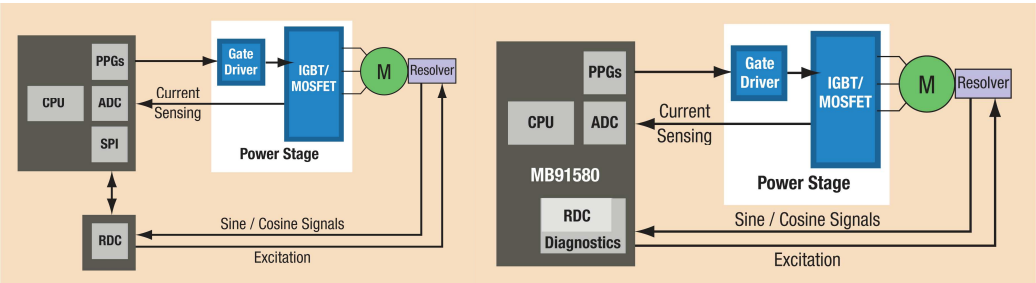
Figure 2: Structure schématique et mécanique d'un résolveur (source: Tyco Electronics Corporation, MCR605)

Les systèmes optiques tels que le codeur incrémental décrit ci-dessus offrent des avantages en termes de performance et de précision. Toutefois, leur plus grande fragilité et vulnérabilité à la poussière et aux conditions de température rendent leur utilisation dans les véhicules motorisés moins aisée. Par rapport à d'autres capteurs, un résolveur peut sembler plus onéreux, mais il est en contrepartie plus solide et fiable. Il peut également détecter la position absolue du rotor à tout moment, même lorsqu'il est à l'arrêt, ce qui n'est pas le cas avec des capteurs Hall ou des codeurs incrémentaux.

Inverseurs dans les véhicules

Dans le cas le plus simple, le système de contrôle du moteur se composera d'un microcontrôleur, d'un étage de sortie, du moteur en liaison avec le capteur (résolveur) pour la position du rotor et du RDC (Figure 3a), qui est généralement installé comme un circuit discret. Cela génère le signal du résolveur et détermine la position du rotor ainsi que l'écart angulaire aussi rapidement et précisément que possible en fonction des informations sinusoïdales/cosinusoïdales rendues.

Ces données doivent être transmises au microcontrôleur de manière à être prises en compte dans les algorithmes de contrôle du moteur comme décrit plus haut. Les RDC externes sont généralement reliés au microcontrôleur (MCU) via une interface périphérique sérielle (SPI). En fonction de la conception du système et du constructeur du RDC, la liaison peut s'effectuer via d'autres ports sériels ou parallèles. Ces solutions présentent un inconvénient de taille dans la mesure où le MCU n'a pas un accès constant aux données du rotor et doit toujours envoyer une requête au RDC externe. Non seulement ce processus est relativement lent, mais il constitue également une source potentielle d'erreurs susceptibles d'avoir un impact négatif sur la sécurité fonctionnelle de tout le système.



Figures 1a et 3b: Contrôle moteur avec RDC externe et RDC intégré

Les microcontrôleurs pour le contrôle moteur simplifient l'architecture du système

Avec sa nouvelle famille de microcontrôleurs MB91580 à 32 bits, Fujitsu Semiconductor adopte une approche complètement différente. Dans un boîtier à 144 broches, un puissant MCU à 32 bits avec une puissance de traitement de 150 DMips offre jusqu'à 1 Mo de mémoire flash avec 128 Ko de RAM, de nombreux ports entrées/sorties, des structures de temporisateur puissant afin de générer tous les signaux de contrôle du moteur ainsi que de multiples interfaces de communication telles que CAN, LIN et FlexRay (Figure 4).
Cette famille de microcontrôleurs a comme caractéristique particulière un RDC intégré avec la fonctionnalité décrite ci-dessus. L'intégration du RDC permet une architecture système nettement simplifiée (Figure 3b). La position du rotor, les valeurs sinusoïdales et cosinusoïdales ainsi que l'écart angulaire sont disponibles à tout moment pour le MCU et peuvent être relevés dans des registres dédiés toutes les 100 ns. Le schéma fonctionnel de la Figure 4 donne un aperçu des ressources disponibles sur la puce.

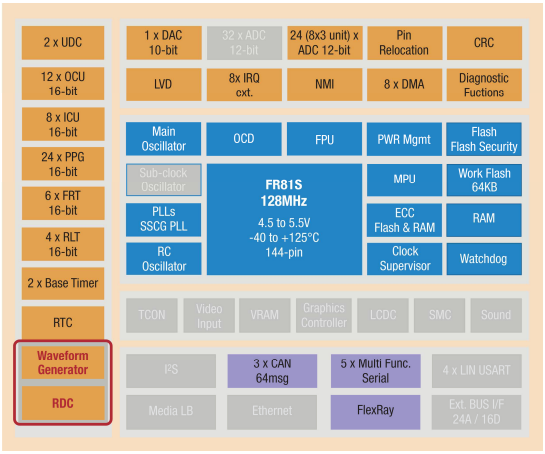


Figure 4: microcontrôleur MB91580 – schéma fonctionnel

Très souvent, les méthodes de développement pour les contrôleurs de moteurs reposent sur des modèles. Aujourd'hui, il existe des logiciels très puissants ayant généralement une chose en commun : l'utilisation de nombres à virgule flottante. Afin de transférer les algorithmes développés de cette manière vers un microcontrôleur conventionnel, les nombres à virgule flottante doivent être convertis en nombres entiers. Comme ce processus n'est pas toujours aisé, le fait que tous les membres de la famille MB91580 offrent, dans leur version standard, une unité à virgule flottante intégrée (FPU) est un grand avantage. En termes de résultats, cela signifie une augmentation de la puissance de calcul et moins de travail lors du portage des modèles vers le monde réel.

Le diagnostic du résolveur accroît la sécurité fonctionnelle

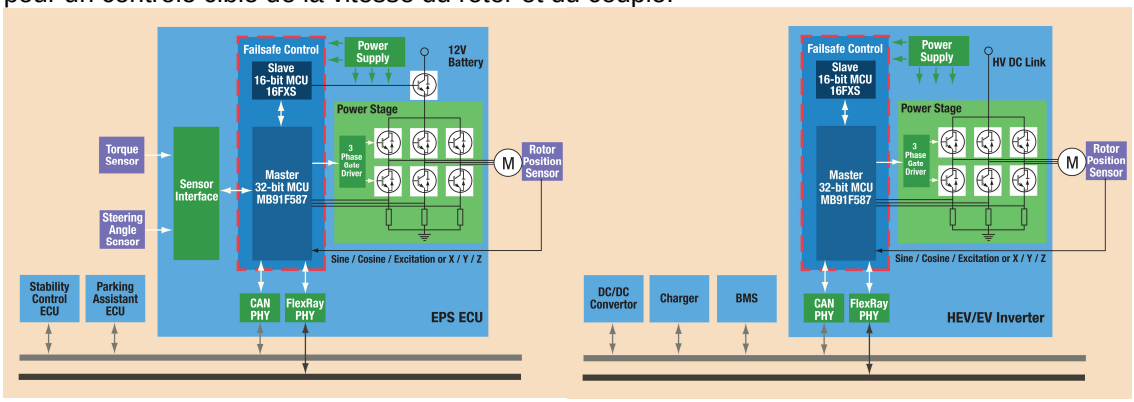
Le MCU peut identifier une défaillance ou un dysfonctionnement du moteur relativement facilement. Par exemple, il se peut que les courants de phase ne correspondent pas aux valeurs attendues, ou que la vitesse visée n'ait pas été atteinte. Dans de tels cas, le MCU peut placer le système dans un état défini – sans compromettre la sécurité du véhicule. Mais comment sera supervisé le résolveur et comment seront diagnostiqués les dysfonctionnements? La famille MB91580 offre dans ce cas-ci également une solution appropriée. Tous les signaux en provenance/en direction du résolveur sont contrôlés via des diagnostics intégrés et des profils d'erreurs tels que des courts-circuits à la terre, des ruptures/coupures de fil ou même des courts-circuits à l'intérieur des bobinages du résolveur peuvent être identifiés de manière rapide et fiable. Si de telles erreurs se produisent, le MCU reçoit immédiatement un signal d'interruption interne et peut ainsi réagir rapidement et de manière ciblée. Tout le processus est interne, avec un temps de latence minimal, ce qui est très différent des systèmes avec RDC externes. Dans ce cas-ci en effet, la défaillance doit être signalée au MCU au moyen d'une interface lente.

Etant donné que la famille MB91580 a été spécialement conçue pour un usage dans les véhicules motorisés, elle offre d'autres fonctions performantes destinées à accroître la sécurité opérationnelle et ce, en provenance directe de l'usine. Par exemple, toutes les mémoires flash ou RAM sont contrôlées par un code de correction d'erreur. Une unité de protection de la mémoire identifie et empêche tout

accès non autorisé à des zones de mémoire interdites. Une sécurité supplémentaire est offerte grâce à un générateur de CRC intégré (CRC16 & CRC32) et aux bits de parité sur les bus internes.

Des microcontrôleurs pour le contrôle moteur dans les véhicules

Les applications des MCU pour le contrôle moteur avec RDC intégré comprennent l'inverseur mentionné ci-dessus pour le moteur électrique. Le schéma fonctionnel d'un inverseur est illustré à la Figure 5a. Dans un souci de sécurité fonctionnelle, le MCU pour le contrôle moteur (maître) est secondé par un deuxième microcontrôleur plus petit (esclave). Les deux microcontrôleurs maintiennent un dialogue constant et dès qu'un comportement anormal est détecté, le MCU esclave peut réinitialiser le système ou interrompre l'alimentation du moteur. Le MCU maître génère les signaux de commutation pour le moteur, mesure et supervise les courants de phase, génère les signaux du résolveur et détermine la position du rotor ainsi que l'écart angulaire via les informations sinusoïdales/cosinusoïdales. Toutes ces données sont utilisées par l'algorithme de contrôle du moteur pour un contrôle ciblé de la vitesse du rotor et du couple.



Figures 5a et 5b: Diagramme d'un inverseur VHE/VE et du contrôle EPS

L'inverseur communique avec le système de gestion de la batterie (BMS) via le réseau interne (CAN ou FlexRay) de manière à garantir également l'alimentation nécessaire.

L'utilisation économique de l'énergie est un critère essentiel dans les véhicules VHE/VE et les systèmes exigeant une alimentation en énergie constante, tels qu'une servo-direction à commande hydraulique, solliciteraient à long terme les systèmes de stockage énergétique de manière excessive. En effet, les systèmes hydrauliques fonctionnent en continu afin d'atteindre la pression nécessaire au moyen d'une servo-pompe.
Par contre, une direction assistée exclusivement électrique (EPS) ne requiert de l'énergie que ponctuellement, en cas de besoin.

En principe, la conception est comparable à celle de l'inverseur pour le groupe motopropulseur. De nouveau, des MCU maîtres et esclaves sont utilisés, mais la partie puissance est différente, notamment au niveau de la régulation. Un PMSM est également utilisé pour cette application, tandis que le résolveur fonctionne comme décrit ci-dessus (Figure 5b).

Cependant, le MCU maître doit encore évaluer le dispositif de la direction et un capteur de couple. Afin que l'assistance à la conduite puisse être apportée de manière correcte à tout moment, d'autres informations telles que la vitesse de déplacement sont nécessaires. Ces données sont fournies via le réseau interne, par exemple le bus CAN. Cette information est utilisée pour calculer le couple supplémentaire requis et pour transmettre ce dernier au moteur électrique sur la colonne de direction. Le but est de soulager autant que possible l'effort à fournir par le conducteur et d'apporter une assistance dynamique au mouvement de braquage. Par exemple, le mouvement de braquage exigera plus d'assistance lorsque le véhicule est presque à l'arrêt, durant les manœuvres de stationnement par exemple, qu'à grande vitesse sur l'autoroute. L'EPS a pour objectif d'améliorer tant le confort du conducteur que sa sécurité. Il est tout à fait possible pour le contrôle de stabilité électronique (CSE) de réguler activement la stabilité du véhicule par une intervention de direction. Il est également possible pour l'EPS d'intégrer un système d'assistance à la conduite qui serait en mesure de stationner un véhicule automatiquement sans l'intervention du conducteur.

Résumé et perspectives

Les véhicules hybrides se multiplient sur le marché et même si, au départ, ils ne sont essentiellement que des systèmes marche-arrêt simples, le nombre de véhicules hybrides complets (VHE) et hybrides rechargeables (VHR) devrait augmenter sensiblement dans les années à venir. Les véhicules tout électriques fonctionnant intégralement sans moteur à combustion interne nécessitent des systèmes de stockage énergétique sûrs, rentables et à haute capacité. Ici également, la technologie connaît une avancée sans précédent, même si les progrès ne sont pas aussi rapides qu'espérés par de nombreuses personnes. Entre temps, il faudra utiliser au maximum l'énergie disponible sous la forme de carburant et/ou d'électricité dans les véhicules hybrides. Ceci sera possible grâce à des algorithmes logiciels efficaces, des microcontrôleurs puissants et des moteurs électriques hautement performants. Un degré plus élevé d'intégration permettra des systèmes de contrôle moteur plus compacts et économiques susceptibles d'être utilisés dans les applications ci-dessus et dans bien d'autres applications.

http://emea.fujitsu.com/semiconductor