

Le FPGA à mémoire flash, un must pour la commande moteur des avions « plus électriques »

Avec le concept MEA (More Electric Aircrafts), les avions deviennent toujours plus « électriques » et les actionneurs embarqués utilisent une électronique de plus en plus sophistiquée. Dans ce cadre, les FPGA à mémoire flash sont un choix à privilégier pour implémenter des fonctions complexes de commande et de surveillance des actionneurs électriques. Explications de Microsemi, l'un des principaux fournisseurs de circuits logiques programmables.

A lors que les compagnies aériennes cherchent à réduire leurs coûts, on se dirige inexorablement vers des conceptions d'avions toujours « plus électriques » MEA (« More Electric » Aircraft). Ces avions permettent de diminuer les coûts d'exploitation et de maintenance grâce à des visites d'entretien plus rapides et moins complexes, d'augmenter la disponibilité des appareils en réduisant le temps moyen entre pannes MTBF (Mean Time Between Failures) et de diminuer fortement les émissions de gaz d'échappement du fait qu'ils sont plus légers et plus efficaces et qu'ils embarquent des systèmes moins encombrants. Le concept MEA remplace en pratique les systèmes hydrauliques, pneumatiques et mécaniques traditionnels par des systèmes électriques moins lourds, plus faciles à installer et à entretenir, et qui minimisent la consommation de carburant. Le but ultime étant d'aboutir à un avion tout électrique.

Traditionnellement, toute la puissance non propulsive est extraite du moteur de l'avion. L'air est soufflé à partir du compresseur à haute pression des moteurs et la puissance pneumatique qui en est ainsi extraite est utilisée pour alimenter le système de contrôle/commande de l'environnement (Environment Control System) et fournir de l'air chaud au système de protection contre le gel des ailes (Wing Ice Protection System). La boîte de vitesses mécanique transfère, quant à elle, la puissance mécanique des moteurs aux pompes

AUTEUR



Shen Wang, étudiant de l'université de Toronto, lors d'un stage de marketing technique chez Microsemi.

hydrauliques centrales. En utilisant un système de tubulures parcourant l'ensemble de l'avion, la puissance hydraulique est fournie aux systèmes d'actionnement des commandes de vol primaires et secondaires, aux systèmes de déploiement et de rétractation du train d'atterrissage, ainsi qu'au système de freinage et aux nombreux autres systèmes qui nécessitent des actionneurs. Une partie de la boîte de vitesses mécanique transfère également la puissance mécanique à un générateur électrique qui alimente l'éclairage avionique, la cabine de l'avion et l'éclairage de signalisation, ainsi que d'autres tâches (les systèmes d'info-divertissement par exemple).

Avantages des systèmes électriques sur les systèmes hydrauliques

Les systèmes hydrauliques utilisent une technologie mature et les améliorations que l'on peut apporter pour obtenir une meilleure efficacité sont négligeables par rapport aux améliorations obtenues en utilisant une technologie électrique. Le système hydraulique est constitué de pompes électriques centrales qui génèrent la pression hydraulique dans les tubulures qui s'étendent le long des nacelles des moteurs, traversent le pare-feu et les pylônes et parcourent tout le fuselage pour atteindre les puits des trains d'atterrissage et les ailes. Chacun des systèmes hydrauliques nécessite des lignes de pressurisation et de retour ainsi qu'un drain pour l'habitacle des

pompes. Ils sont généralement à triple redondance. Les tubulures sont protégées contre les liquides inflammables au sein du système hydraulique. Tout ce dispositif de protection, de redondance et de tubulures est néanmoins lourd. Le concept

1 VUE D'ENSEMBLE

L'intégration de systèmes électroniques de commande et l'Airbus A380, mais des progrès en termes de poids que les avionneurs se décident à adopter un s



MEA permet des solutions structurales plus simples avec moins de boucliers thermiques et de protections contre les fluides inflammables dans tout l'avion. Le résultat en est des avions plus légers, une complexité moindre et des exigences réduites en termes de certification pour la structure de l'avion.

En outre, toutes ces tubulures imposent en cas de fuite une maintenance sur la totalité du trajet des tubes, sachant que les pompes entraînées par le moteur et les joints de pressurisation exigent également des vérifications d'entretien constantes. La maintenance de ces systèmes est coûteuse, d'autant plus que les systèmes hydrauliques ont un court MTBF. Par contre, avec un système électrique constitué d'actionneurs électrohydrauliques ou entièrement électriques, la tuyauterie hydraulique n'est plus nécessaire sur l'ensemble de l'avion, ce qui réduit considérablement le poids total. Airbus estime ainsi qu'une réduction de poids d'environ 455 kg a été obtenue sur les

avions A380 depuis qu'un actionneur d'aileron hydraulique a été remplacé par un actionneur électrohydraulique ou électromécanique. L'élimination d'une grande partie des systèmes hydrauliques améliore aussi le MTBF du système et le rend plus fiable. Cela se traduit également par des gains en performances, puisque le système de pompe hydraulique est une charge continue sur le moteur alors que la charge électrique ne se fait que sur demande ou en cas de besoin. Toutes ces économies et améliorations diminuent la consommation globale en carburant de l'avion et réduit d'autant le coût de fonctionnement. De plus, l'efficacité de la séparation et de l'indépendance de l'actionnement électrique assure une plus grande robustesse à l'ensemble du système (figure 1).

Les défis à relever pour les actionneurs

Il y a beaucoup de défis majeurs à relever dans le cadre du développement d'avions plus électriques de

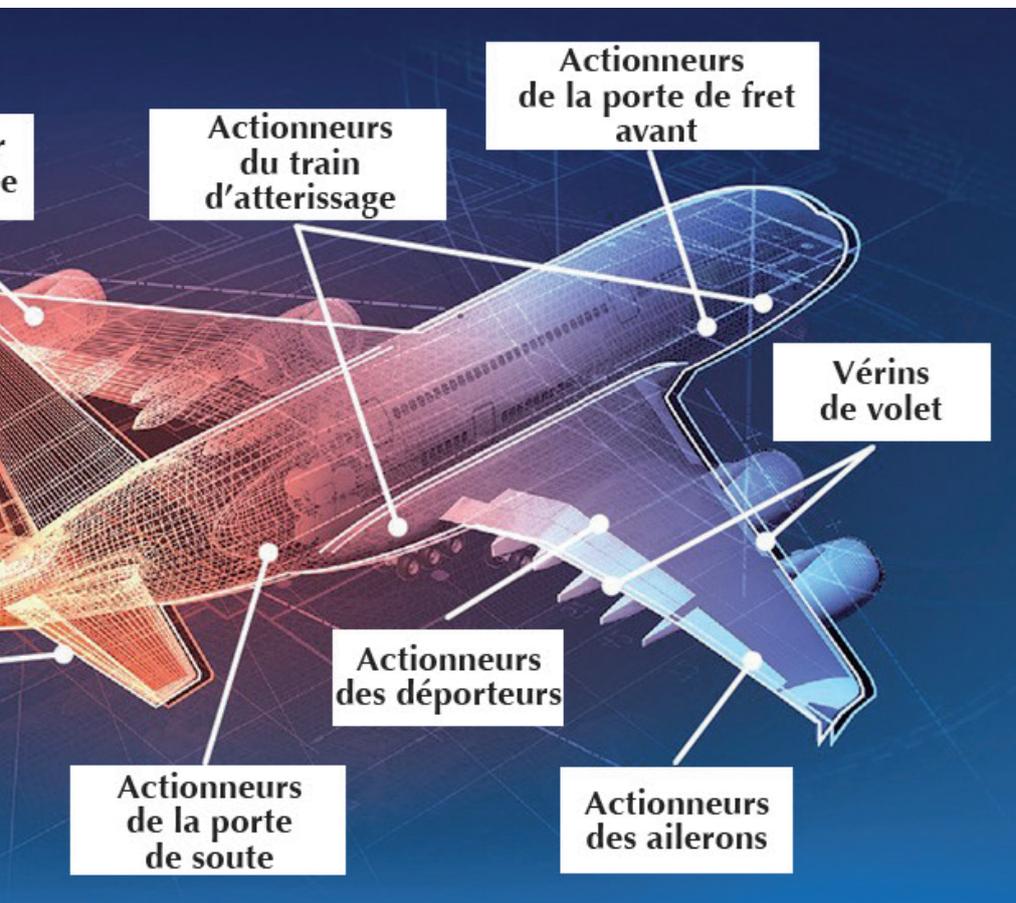
type MEA, et l'un d'eux est lié à la gestion et à la distribution de l'énergie électrique. Il est en effet nécessaire d'avoir un contrôle électronique en réseau pour tous les systèmes électriques distribués sur la totalité de l'avion. Puisque chaque système nécessite désormais de l'énergie électrique, l'architecture de contrôle doit être améliorée et suffisamment robuste pour gérer les exigences de haute fiabilité d'équipements comme le système de commandes de vol. Chaque actionneur intègre de l'électronique qui prend en charge la commande moteur et la surveillance de la santé de l'actionneur, fournissant ainsi un retour aux commandes de vol. L'électronique des actionneurs est exposée à des conditions environnementales difficiles en termes de température de fonctionnement, de pression et d'altitude. Les plus récents FPGA (Field Programmable Gate Arrays) à base de mémoire flash sont toutefois capables de fonctionner parfaitement dans ces environnements difficiles avec une grande fiabilité.

Dans les conceptions, les actionneurs électriques actuellement développés utilisent souvent des moteurs AC sans balais à aimant permanent qui nécessitent une électronique sophistiquée pour effectuer les fonctions de commande et de surveillance. Le développement du contrôleur de type proportionnel-intégral PI (Proportional-Integral), du modulateur vectoriel, du modulateur de largeur d'impulsion PWM (Pulse Width Modulation), du limiteur de vitesse, de l'estimateur de position et de vitesse ou d'autres outils pour la commande et la surveillance des actionneurs s'avère toutefois chronophage et nécessite une validation robuste et une vérification avant toute utilisation au sein d'actionneurs pour l'aviation commerciale. Il existe néanmoins de nombreuses façons de relever ce défi, parmi lesquelles on trouve l'utilisation de microcontrôleurs (MCU), de processeurs de signaux numériques (DSP), de circuits intégrés à application spécifique (ASIC) et de FPGA.

Les MCU et DSP sont traditionnellement utilisés pour le traitement des algorithmes dans les conceptions utilisant la commande de moteurs à axe simple ou double. Il y a toutefois un besoin croissant en moteurs mul-

BLE DES ACTIONNEURS ÉLECTRIQUES ET HYDRAULIQUES DÉPLOYÉS DANS UN BOEING 787

Le contrôle de puissance est déjà avérée dans les avions commerciaux modernes tels que le Boeing 787. Les défis de technologie, de rendement, de fiabilité, de poids et de coût sont encore nécessaires avant un système d'actionnement tout électrique.



ti axes ou à vitesse de rotation couplés à des fonctions de surveillance de leur état, de remontée d'informations et de communications sécurisées. Dans ce cadre, les MCU et DSP ne sont pas aussi efficaces qu'une solution à base de FPGA à mémoire flash lorsqu'il s'agit de répondre parfaitement à ces exigences croissantes en performance. Les FPGA à mémoire flash offrent de meilleures performances que les solutions à base de MCU/DSP pour le traitement d'algorithmes à grande vitesse et faible latence, ainsi que pour l'intégration de fonctionnalités supplémentaires au système afin d'optimiser le coût total d'exploitation.

Par ailleurs, l'optimisation de l'électronique de puissance pour les applications de commande moteur dans l'avion nécessite une large bande de fréquences de commutation pour améliorer les performances du système. Or les DSP et MCU ne fonctionnent pas bien dans des applications exigeant de hautes fréquences de commutation. Certains DSP peuvent optimiser quelques canaux pour la commutation à haute fréquence, mais il leur manque la capacité de s'adapter rapidement à l'évolution des exigences. Il leur est impossible également d'accroître le nombre de canaux à modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour contrôler l'étage de l'électronique de puissance. Dans les systèmes actuels, cette tâche est donc souvent confiée à un FPGA, sachant que les ASIC et

ASSP (Application-Specific Standard Products) sont confrontés au même manque de souplesse et d'échelonnabilité que les DSP et MCU.

Les conceptions de commande moteur bénéficient aussi largement de la réduction de la consommation d'énergie statique et totale, en particulier à des fréquences et températures élevées. Les FPGA qui comportent une cellule flash embarquée à transistor unique offrent ici un avantage sur les alternatives qui utilisent une cellule SRam à six transistors devant être configurée à partir d'une ROM externe lors de la mise sous tension. Les récents FPGA à base de mémoire flash utilisent une approche globale pour réduire au minimum la consommation d'énergie, résultant en une diminution de 50% de la consommation totale et de 10% de la consommation statique par rapport à des solutions à base de FPGA SRam. Bon nombre de problèmes relatifs à la complexité croissante des systèmes de commande moteur pour les moteurs sans balais à courant alternatif utilisés dans les actionneurs MEA peuvent donc être résolus avec la mise en œuvre et l'utilisation de FPGA à base de mémoire flash en tant que contrôleurs principaux.

Les FPGA au cœur de l'architecture du système MEA

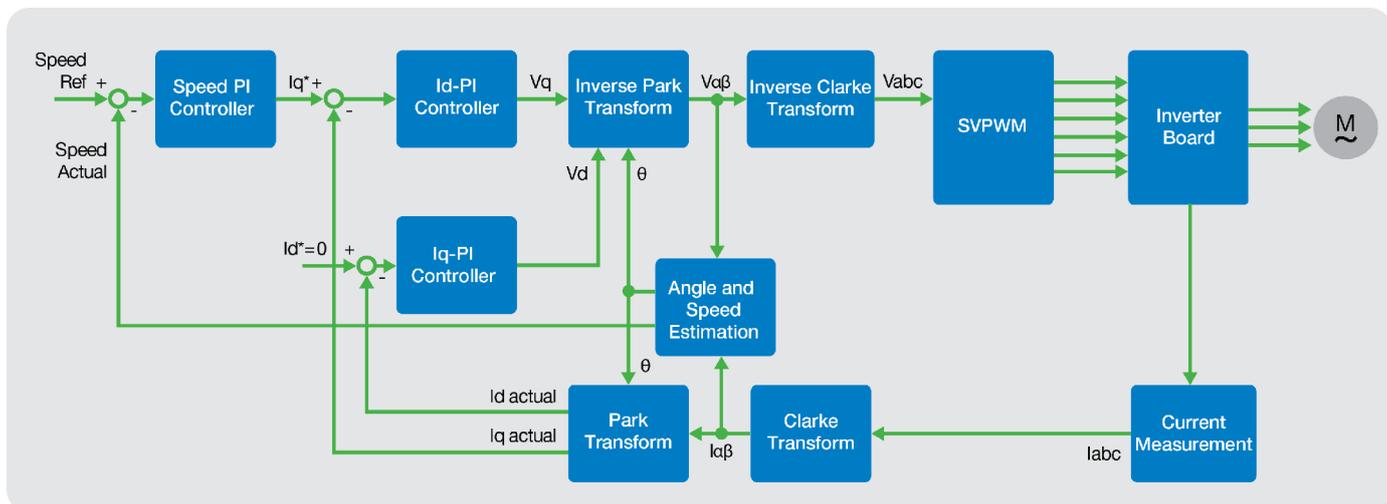
La première étape vers les objectifs définis par le concept MEA est liée à l'utilisation d'actionneurs électrohy-

drauliques ou électromécaniques. Cette transition dans les conceptions est permise via un système électronique de commande de puissance (Power Drive Electronics, PDE) qui utilise le bloc d'alimentation électrique pour commander les zones d'actionneurs en lieu et place de l'alimentation hydraulique classique. Le module PCM (Power Core Module) du PDE s'appuie sur un HPD (Hybrid Power Drive) qui effectue la conversion de puissance et pilote les moteurs des actionneurs. Le PCM comporte également des fonctions de conversion de données et de communication qui sont implémentées et contrôlées en utilisant un FPGA. L'algorithme de commande moteur est en fait intégré dans le FPGA qui est placé dans le module de commande du PDE. Ce FPGA est programmé pour exécuter diverses fonctions telles que l'acquisition des informations de position et de vitesse provenant de capteurs externes, le traitement des données pour la commande moteur et la communication. Le module de surveillance, quant à lui, est nécessaire pour tester le bon état du PDE. Cette fonction critique de sécurité est également implémentée dans un FPGA.

L'intégration de systèmes électroniques de contrôle de puissance est déjà avérée dans les avions commerciaux modernes tels que le Boeing 787 et l'Airbus A380, mais des progrès en termes de technologie, de rendement, de fiabilité, de poids et

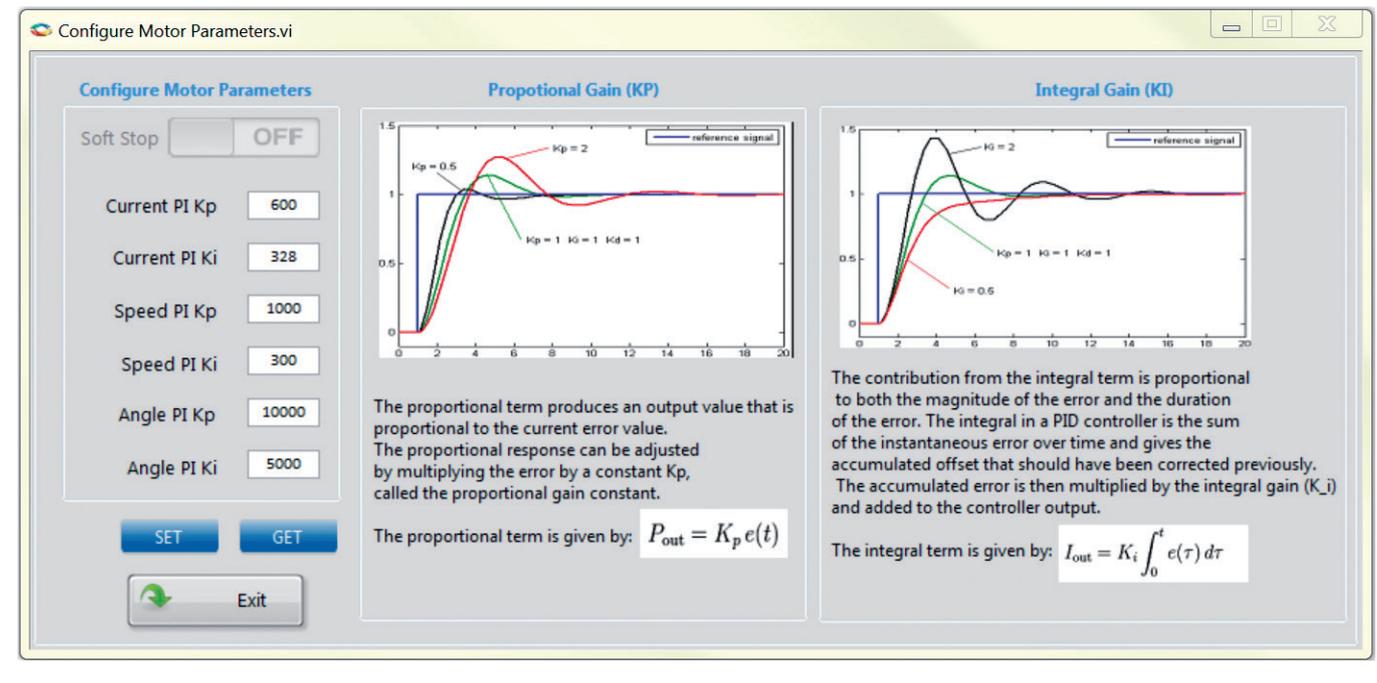
2 BLOCS FONCTIONNELS DU KIT DE COMMANDE MOTEUR AVEC TECHNIQUE DE COMMANDE VECTORIELLE SANS CAPTEURS

Les plus récents FPGA à base de mémoire flash sont proposés dans un kit de commande moteur à deux axes disposant de sa propre suite d'IP pour les moteurs synchrones à aimants permanents PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motors), les moteurs sans balais BLDC (Brushless DC) et les moteurs pas à pas.



3 INTERFACE UTILISATEUR DU KIT DE DÉVELOPPEMENT DE COMMANDE MOTEUR

Le kit est associé à un logiciel qui donne au concepteur un accès complet aux paramètres de commande du moteur tels que la vitesse de référence et les gains Kp/Ki des contrôleurs PI.



de coût sont encore nécessaires avant que les avionneurs se décident à adopter un système d'actionnement tout électrique.

Les IP de commande moteur pour FPGA

Les plus récents FPGA à base de mémoire flash sont proposés dans un kit de commande moteur à deux axes disposant de sa propre suite d'IP pour les moteurs synchrones à aimants permanents PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motors), les moteurs sans balais BLDC (Brushless DC) et les moteurs pas à pas, et équipé d'interfaces pour les encodeurs et les capteurs à effet Hall pour assurer la surveillance. Ce kit de commande moteur dispose également des connexions Ethernet, UART et USB pour les communications. La suite IP entièrement modulaire contient pour sa part des transformées pour commande à flux orienté FOC (Field Oriented Control) telles que transformées de Clarke, Park, Clark inverse et Park inverse, un régulateur PI, une modulation vectorielle, un module PWM triphasé, un limiteur de vitesse, un estimateur de position et de vitesse, une interface pour encodeur et des blocs fonctionnels pour les générateurs d'angles pas à pas. Cette suite permet une approche rapide de type plug-and-play pour la

mise en œuvre d'une conception avec ces blocs modulaires (figure 2). Le kit est par ailleurs associé à un logiciel qui donne au concepteur un accès complet aux paramètres de commande du moteur tels que la vitesse de référence et les gains Kp/Ki des contrôleurs PI (figure 3).

Dans la pratique, la suite d'IP fournit une estimation précise de l'angle pour les commandes vectorielles FOC sans capteurs ainsi qu'un PWM avec protection contre les temps morts et les retards. Ces blocs d'IP sont tous codés pour l'utilisation la plus efficace des ressources du FPGA. Puisque la suite d'IP est intégrée au FPGA, elle est plus facile à certifier que les logiciels fonctionnant sur un microcontrôleur ou un DSP car il n'y a pas besoin de certification DO-178C. En outre une documentation supplémentaire pour une validation et une vérification robustes est disponible en VHDL pour aider les concepteurs à certifier leurs conceptions selon la norme DO-254. Ce riche ensemble d'outils IP améliore les temps de mise sur le marché des projets tout en respectant les objectifs de sécurité et de fiabilité. Comme pour tout équipement électronique embarqué dans un avion, il existe le danger toujours présent des effets « singuliers » SEU (Single Event Upsets) des radiations ionisantes.

Aux altitudes de vol, les appareils électroniques sont en effet affectés par les effets des neutrons jusqu'à 500 fois plus fréquemment que par rapport au niveau de la mer.

Les effets des radiations dans les avions commerciaux

Ce niveau élevé de rayonnement neutronique rend les FPGA SRam extrêmement vulnérables aux perturbations des configurations qui modifient les fonctionnalités du FPGA jusqu'à ce qu'elles soient effectivement détectées et corrigées. Par contre, lors d'un test extensif de rayonnement neutronique, les FPGA à base de mémoire flash n'ont subi aucune perturbation de configuration et aucun effet de latch-up dus à des événements singuliers. Le test a mis en œuvre une exposition cumulée de plus de $1,1 \times 10^{12}$ neutrons/cm², une exposition qui équivaut à plus de 9 millions d'années au niveau de la mer à New York, ou 17 400 années à une altitude de 40 000 pieds au-dessus de New York. Cette immunité intrinsèque aux effets sur la configuration des SEU et des SEL (Single Event Latchup) réduit les exigences en termes de redondance et de protection contre les radiations, diminuant ainsi la complexité des futures conceptions. ■