Le contrôle numérique optimise dynamiquement l'efficacité des bus intermédiaires

Patrick Le Fèvre, Directeur Marketing et Communications, Ericsson Power Modules

Dans les années 1990, la nécessité d'alimenter les puces de silicium au cœur des infrastructures de communications avec de nombreux régulateurs délivrant moins de 5 V avec de forts courants, a conduit les concepteurs à adopter des architectures d'alimentation distribuées (DPA, pour distributed power architecture). Classiquement, dans une architecture DPA, un adaptateur AC-DC frontal convertit l'alimentation secteur en une tension continue distribuée sur un rail qui alimente un certain nombre de « briques » convertisseurs DC-DC, chacune alimentant une charge basse tension. Ce modèle a évolué vers l'architecture de bus intermédiaire (IBA) qui domine désormais, et qui utilise un convertisseur DC-DC isolé supplémentaire, abaissant la tension du rail de distribution à un niveau intermédiaire ; ce « convertisseur de bus intermédiaire » alimente un deuxième étage de convertisseurs abaisseurs non isolés, dits convertisseurs de point de charge (POL), qui fournissent les tensions requises aux circuits de charge.

L'approche de conversion descendante IBA à double étage offre plusieurs avantages par rapport au modèle DPA à un étage, notamment celui de minimiser les coûts liés à l'isolation de chaque convertisseur DC-DC. Il est difficile d'isoler et d'abaisser avec efficacité et précision une tension de rail de distribution d'un niveau standard industriel tel que 48 VDC (avec des tolérances de 36 à 75 VDC), vers 3,3 VDC et en dessous, en une étape, tout en fournissant une quantité d'énergie significative. L'approche IBA à deux étages simplifie quelques problèmes de conception, puisqu'elle permet de réguler de manière assez lâche la tension de bus intermédiaire à un niveau moyen convenant aux convertisseurs POL qui, eux, fournissent à la charge une tension très finement régulée.

Avec les convertisseurs de bus intermédiaire analogiques, il est souvent possible d'ajuster la tension de sortie autour de 12 VDC au moyen d'une broche de strap, afin de garantir une marge suffisante aux convertisseurs POL dans les pire cas. Cela marche bien pour les systèmes fonctionnant continuellement pratiquement à la puissance maximum ; mais les techniques dynamiques de conservation d'énergie se généralisent ; en réagissant à l'état du trafic au sein des infrastructures de réseau, elles créent de larges fluctuations de charge qui ont un impact sur l'efficacité de la conversion. Il devrait être possible d'économiser de l'énergie en optimisant le niveau de tension régulé pour les convertisseurs POL, à mesure que la charge évolue, sans compromettre la performance du convertisseur de bus intermédiaire. Cela demande des composants d'alimentation programmables qui procurent une information de retour, et exige une souplesse bien plus grande que celle couramment offerte par les convertisseurs analogiques.

Plus d'efficacité et de souplesse grâce à une boucle interne de contrôle numérique

Même les mieux conçus des modules convertisseurs DC-DC isolés analogiques posent quelques problèmes difficiles à régler, comme l'équilibrage du rendement, la performance de la régulation ou encore la densité de puissance. Un convertisseur quart de brique représentatif de 204 W fournit une sortie de 12 VDC régulée à ±2% avec un

rendement typique de 94% à demi charge. Un dispositif de 204 W à topologie demi pont isolée implémente le contrôle de la tension du côté secondaire, pour fournir une régulation serrée, tandis que son homologue à pont complet et à commutation dure utilise un contrôle de tension du côté primaire privilégiant la puissance de sortie. Ces dispositifs sont configurés pour un rendement optimum entre 50 et 70% de charge.

Combinant une topologie de pont complet avec un contrôle côté secondaire difficile à implémenter dans cette configuration, un produit de nouvelle génération utilise une boucle de contrôle numérique interne qui permet d'obtenir 396 W avec une régulation de ±2% et un rendement typique de 96% ou plus. Par rapport à ses prédécesseurs, les courbes de rendement de ce convertisseur sont aplanies, et sa zone efficace s'étend plus loin vers les faibles charges. De plus, ce convertisseur est programmable et fournit en temps réel des rapports sur ses paramètres de fonctionnement. La **figure 1** compare le cœur d'un convertisseur buck analogique avec son équivalent à contrôle numérique.

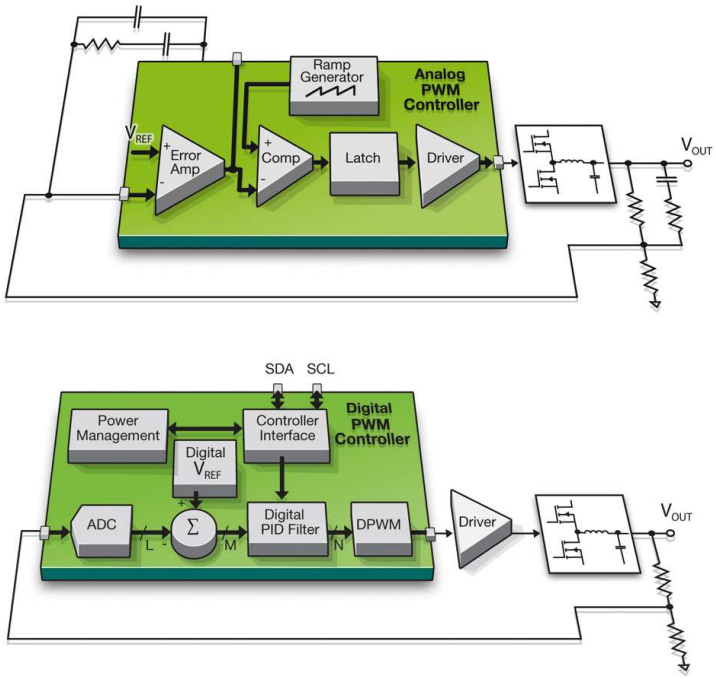


Figure 1. Comparaison entre contrôle analogique et à boucle interne numérique

L'amplificateur d'erreur, le générateur de rampe, le comparateur et le verrou utilisés par le système analogique pour moduler le flux PWM sont remplacés, avec le convertisseur analogique/numérique, par une référence numérique, un additionneur et un filtre numérique. Comme le système numérique utilise des nombres pour caractériser les réponses de la boucle, plutôt que des valeurs fournies par des composants passifs, il peut régler finement en temps réel son fonctionnement selon la charge, optimisant le rendement sur une plage plus vaste que ses homologues analogiques les mieux conçus.

De plus, le contrôleur numérique utilisant un processus silicium à signal mixte, le coût d'un sous-système de mesure et de contrôle et d'une interface de communications est négligeable. Le protocole PMBus récemment adopté a fait faire aux convertisseurs à contrôle numérique un bond en fonctionnalité par rapport aux convertisseurs analogiques : avec un simple bus à quatre conducteurs et un jeu de commandes standard, une application logicielle peut lire en temps réel des paramètres de tension, courant ou température de la puce. Le logiciel peut programmer des paramètres au vol ; cela va du réglage de la tension de sortie à la modification des constantes de filtres qui déterminent la performance dynamique du convertisseur. Les fonctions programmables incluent le séquencement du rail d'alimentation, le contrôle de la vitesse de balayage, les seuils d'alerte et d'erreurs et des actions de récupération d'erreur qui, une fois programmées, fonctionnent de manière autonome. Développées à l'origine pour les convertisseurs de bus intermédiaire, des fonctions similaires apparaissent dans certaines familles de convertisseurs POL à contrôle numérique.

Une implémentation avancée de bus intermédiaire

La possibilité de lire les paramètres de chaque convertisseur et d'effectuer des ajustages au vol facilite la mise au point de techniques de contrôle dynamique de tension de bus, où le logiciel de supervision donne l'ordre au convertisseur de bus intermédiaire de baisser sa tension de sortie quand la demande en énergie décroît, et inversement de l'augmenter en cas de besoin. L'objectif est de minimiser les pertes dynamiques subies par les convertisseurs POL sans compromettre le rendement du convertisseur de bus intermédiaire, ce qui économise globalement de l'énergie au niveau du système. Cependant, les différentes combinaisons de convertisseurs génèrent des interactions complexes qui sont difficiles à visualiser ; d'où l'intérêt de la modélisation et de la simulation pour développer les algorithmes d'optimisation. Afin d'évaluer le potentiel de ces techniques, les ingénieurs d'Ericsson Power Modules ont choisi un montage de test constitué d'un convertisseur de bus intermédiaire avancé BMR453, alimentant deux convertisseurs POL numériques BMR450 de 20 A et quatre BMR451 de 40 A.

La première étape de la mise au point de l'algorithme d'optimisation a été d'acquérir quelques données réelles pour construire le modèle. La **figure 2** donne un tracé des pertes énergétiques d'un BRM450, dont la tension de sortie est de 1 VDC et dont la charge passe de 0 à 20 A, tandis que la tension d'entrée est échelonnée de 4,5 à 14 VDC.

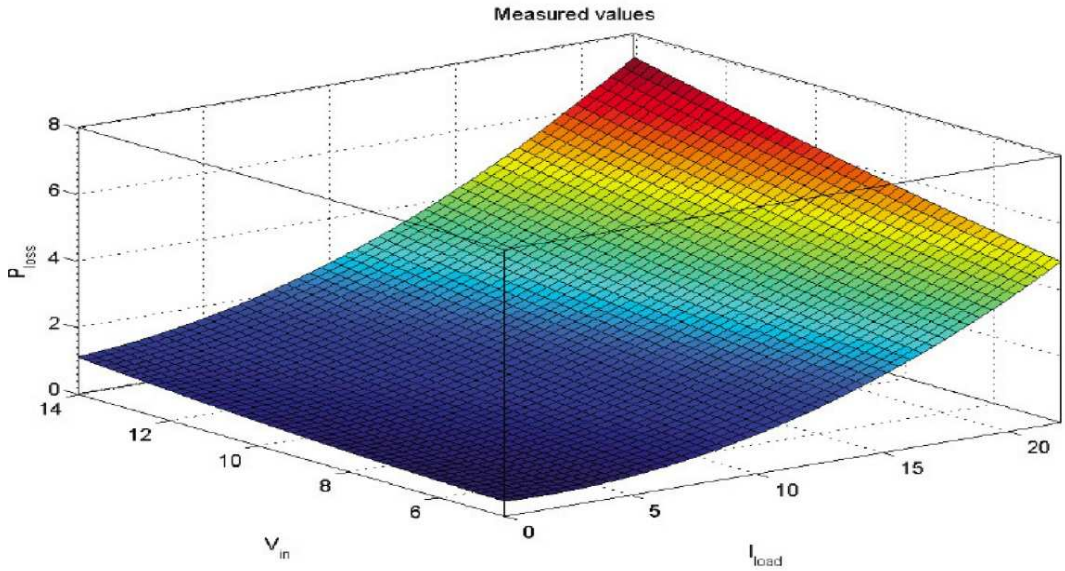


Figure 2 : Données mesurées sur le régulateur POL BMR450 de 20 A lorsque sa tension d'entrée varie de 4,5 à 14 VDC et son courant de charge de 0 à 20 A.

Les modèles polynomiaux de chaque régulateur ont été construits à partir de ces résultats de mesure par la méthode des moindres carrés. Ces données ont été chargées dans l'environnement Simulink pour créer un modèle reproduisant le montage de test, ce qui a permis de visualiser les interactions entre les composants du système d'alimentation et de simuler leurs réponses aux variations de paramètres. Il a aussi été possible d'évaluer les effets d'algorithmes alternatifs de contrôle dynamique de bus.

L'approche mise en œuvre commence par l'exécution d'un algorithme définissant la perte d'énergie de base. Le premier cycle de mesures et de contrôle commence ensuite, en surveillant la perte d'énergie relative jusqu'à ce qu'elle atteigne un seuil, ce qui déclenche une séquence d'optimisation de la tension de bus intermédiaire. Cet algorithme complexe effectue de nombreuses itérations, amenant finalement la tension de bus intermédiaire à la valeur optimum, qui minimise les pertes d'énergie dans les conditions du moment ; une fois la tension optimum atteinte, la séquence se termine. Le cycle se répète en tenant compte de contraintes incluant l'hystérésis de seuil de déclenchement et la tension de bus minimum nécessaire à la régulation pour un courant de charge donné.

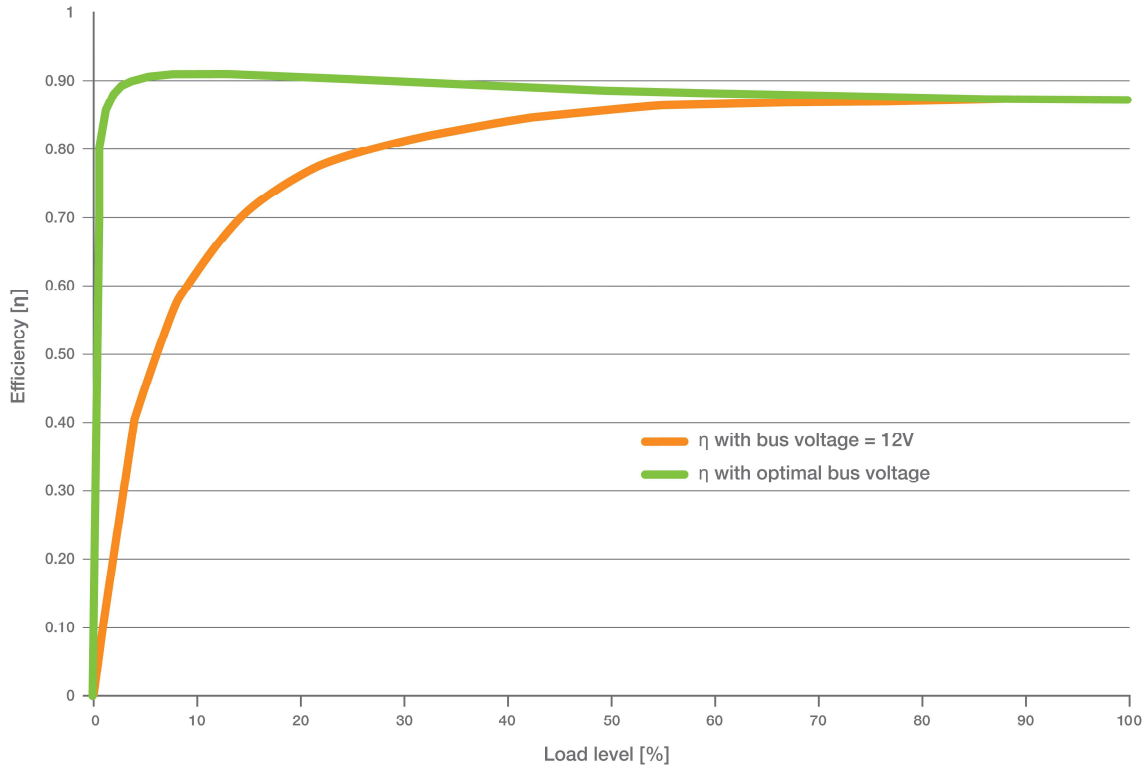


Figure 3 : Amélioration du rendement par optimisation de la tension de bus intermédiaire

La figure 3 montre l'amélioration de la courbe de rendement obtenue en faisant varier la tension de bus intermédiaire, par comparaison avec la tension intermédiaire fixe de 12 VDC, pour l'exemple du montage test. Point important, ces améliorations s'accroissent avec la complexité et l'énergie du système.

Dans le contexte du développement d'un système d'alimentation, la technologie des convertisseurs d'énergie numériques permet aux utilisateurs d'explorer plusieurs scénarios de gestion d'énergie, avec la possibilité d'économiser de grandes quantités d'énergie, et cela, bien plus facilement qu'il n'était possible auparavant. www.ericsson.com/powermodules.