

Contrôle numérique de la conversion de puissance : de nouvelles opportunités pour la conception d'alimentations à découpage

L'utilisation de la régulation numérique des convertisseurs de puissance a connu une croissance rapide au cours des cinq dernières années. L'industrie profitant des nombreux avantages que le contrôle numérique apporte à un domaine traditionnellement analogique. Une croissance qui a été soutenue par divers fournisseurs de microcontrôleurs, qui ciblent spécifiquement le marché de la conversion d'énergie numérique.

Dans une alimentation à découpage analogique traditionnelle, la commande de l'oscillateur effectuant la fonction de découpage est réalisée à l'aide d'un circuit intégré, constitué d'amplificateurs opérationnels et de comparateurs, et d'un filtre de compensation constitué de composants discrets, de condensateurs et de résistances soigneusement sélectionnés. Ceux-ci donnent à l'alimentation les performances souhaitées, aussi bien sur les charges transitoires que pour sa stabilité dans le domaine fréquentiel, le domaine s . Le filtre de compensation est fixe, et souvent limité par la bande passante de l'optocoupleur de la boucle de régulation (figure 1).

Quand nous parlons de convertisseur numérique, nous entendons par là que la boucle de régulation, qui régule et stabilise la tension de sortie de l'alimentation, est numérique, et qu'elle remplace les circuits de commandes analogiques utilisés depuis les années 1980. Dans l'alimentation numérique représentée sur la figure 2, le circuit de commande analogique et le filtre de compensation analogique associé ont ainsi été remplacés par un microcontrôleur.

Rôle du microcontrôleur dans l'alimentation numérique

Le microcontrôleur est utilisé pour asservir la boucle de régulation de l'alimentation. Dans une alimentation à commande numérique typique, le

AUTEUR



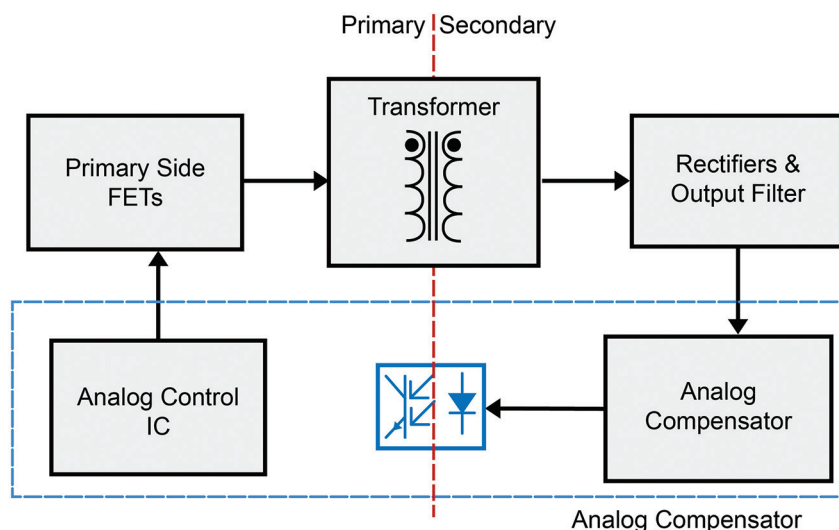
Gary Bocoock, directeur technique, XP Power.

module de conversion analogique-numérique (CAN) intégré au microcontrôleur échantillonne la tension ou le courant de sortie. Celui-ci est comparé à une valeur de consigne ou de référence, et donne une valeur d'erreur. Ce terme d'erreur est ensuite utilisé comme entrée pour le contrôleur à temps discret (généralement un contrôleur à deux pôles et deux zéros, ou trois pôles et trois zéros) qui a des pôles et des zéros dans le domaine fréquentiel discret, le domaine z . L'échantillonnage est exécuté à des intervalles de temps exacts et prédéfinis – chaque fois qu'un nouvel échantillon est disponible.

Un exemple de contrôleur à temps discret est représenté sur la figure 3. L'unité multiplicateur-accumulateur (MAC), qui est intégrée dans un processeur de signal numérique (DSP), réalise cinq opérations de multiplication et d'accumulation. L'entrée du contrôleur échantillonne le signal $x[n]$, le terme d'erreur, et le multiplie par le coefficient B_0 . Le terme z^{-1} est un opérateur retard unité, et entraîne la multiplication de l'échantillon précédent, $x[n-1]$, par le coefficient B_1 . Puis, un autre opérateur retard unité entraîne la multiplication du terme d'erreur du deuxième échantillon précédent, $x[n-2]$, par B_2 . Sur le côté droit de la figure 3, le même proces-

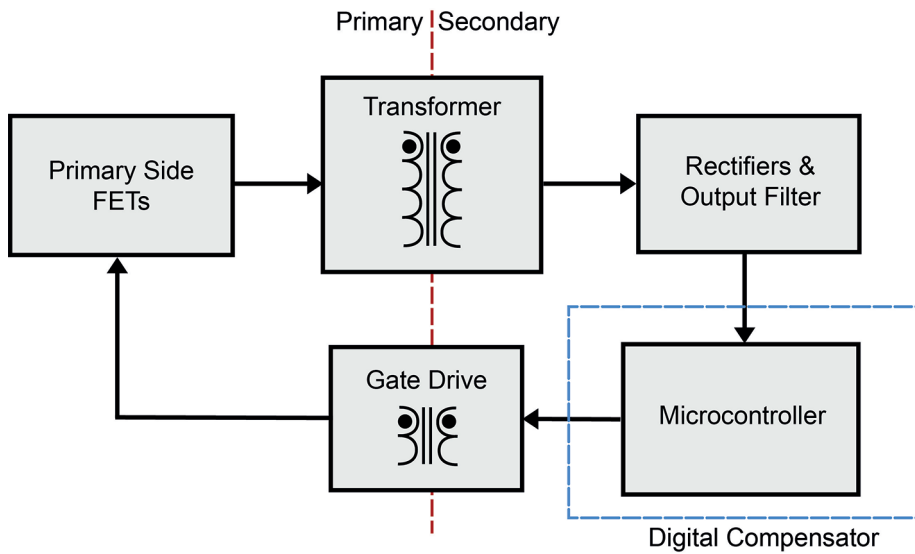
1 PRINCIPE D'UNE ALIMENTATION À DÉCOUPAGE AVEC UNE RÉGULATION ANALOGIQUE

Dans une alimentation à découpage analogique traditionnelle, la commande de l'oscillateur effectuant la fonction de découpage est réalisée à l'aide d'un circuit intégré, constitué d'amplificateurs opérationnels et de comparateurs, et d'un filtre de compensation.



2 PRINCIPE D'UNE ALIMENTATION À CONTRÔLE NUMÉRIQUE

Dans l'alimentation numérique représentée ici, le circuit de commande analogique et le filtre de compensation analogique associé ont été remplacés par un microcontrôleur.



sus est appliqué à la sortie du contrôleur. La sortie précédente du contrôleur, $y[n-1]$, est multipliée par A_1 et la sortie de deux périodes d'échantillonnages précédentes, $y[n-2]$, est multipliée par A_2 . Ces multiplications sont cumulées et le résultat donne la nouvelle sortie du contrôleur pour cette période d'échantillonnage. La sortie du contrôleur, $y[n]$, est la nouvelle valeur du rapport cyclique pour les convertisseurs PWM ou de la fréquence de commutation pour les topologies résonantes PFM (Pulse Frequency Modulation).

Tout comme les compensateurs analogiques dans le domaine s , le contrôleur à temps discret représenté sur la figure 3 aura une réponse en fréquence dans le domaine z . Ce sont les coefficients du contrôleur qui déterminent la réponse en fréquence et donc la stabilité de l'alimentation. Par conséquent, l'ingénieur doit calculer analytiquement les coefficients du contrôleur afin de stabiliser l'alimentation.

Les microcontrôleurs ont été utilisés dans les alimentations à découpage depuis de nombreuses années dans le but de mettre en œuvre des fonctionnalités de base telles que le PMBus (Power Management Bus) et le contrôle de la vitesse du ventilateur, en utilisant des microcontrôleurs relativement simples et peu coûteux. Cependant, le contrôle numérique intégral s'est développé plus rapidement sur le marché des serveurs et des télécoms, et plus len-

tement dans les marchés industriels et médicaux.

Les facteurs interdisant le passage au contrôle numérique ont été principalement le coût et la complexité. Les bonnes nouvelles sont que le coût d'un microcontrôleur moderne avec les fonctionnalités d'un DSP nécessaire pour mettre en œuvre le contrôle numérique complet, a diminué considérablement ces dernières années, rendant leur utilisation viable pour davantage de modèles. Cependant, la complexité reste un problème. Cette complexité provient du besoin d'une approche de domaine mixte pour concevoir l'alimentation électrique ; les ingénieurs doivent combiner leurs connaissances en matière de conception d'alimentation électrique avec la

capacité d'écrire un code efficace et de stabiliser la boucle de contrôle à temps discret.

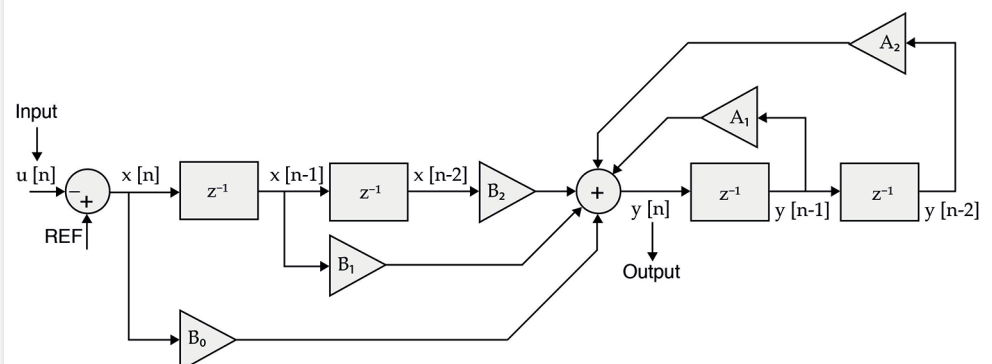
Pourquoi utiliser le contrôle numérique

Alors, quelles sont les raisons pour passer au contrôle numérique ? La boucle de contrôle numérique présente de nombreux avantages par rapport à sa contrepartie analogique. L'alimentation numérique est insensible à l'environnement, à la température, au vieillissement et aux tolérances des composants de la boucle de régulation. Cela permet au système de surveiller les performances de l'alimentation en temps réel et d'ajuster les paramètres en fonction des besoins requis. De plus, les techniques avancées de contrôle à temps discret nous permettent d'obtenir des performances supérieures à celles des compensateurs analogiques, en récupérant des transitoires en quelques périodes de commutation. Cela a été particulièrement intéressant pour le marché des convertisseurs Point Of Load (POL), qui a été un grand utilisateur de l'énergie numérique. Un microcontrôleur à hautes performances peut être utilisé pour stabiliser et réguler plusieurs étages de puissance, éliminant ainsi le besoin de circuits de commande analogiques individuels pour chaque étage de puissance.

La demande toujours plus importante de convertisseurs à haut rendement est un domaine dans lequel la flexibilité de l'alimentation numérique offre des solutions au-delà de la capacité des schémas de contrôle analogique typiques. Cela peut impliquer d'ajuster le fonctionnement de l'ali-

3 CONTRÔLEUR À TEMPS DISCRET À DEUX PÔLES ET DEUX ZÉROS

Dans une alimentation à commande numérique typique, le module de conversion analogique-numérique (CAN) intégré au microcontrôleur échantillonne la tension ou le courant de sortie. Celui-ci est comparé à une valeur de consigne ou de référence, et donne une valeur d'erreur. Ce terme d'erreur est ensuite utilisé comme entrée pour le contrôleur à temps discret (généralement un contrôleur à deux pôles et deux zéros).



mentation pour obtenir des commutations à zéro de tension ou de courant (ZVS ou ZCS) –réduisant ainsi les pertes de commutation et augmentant le rendement global. Par ailleurs, nous pouvons également considérer l'impact de l'amélioration du rendement sur l'ensemble d'un centre de données ou d'un système, dans lequel de nombreuses alimentations à découpages sont utilisées. Cela pourrait être réalisé en répondant à des requêtes d'arrêt ou de passage en mode basse consommation sur la base des informations provenant d'un contrôleur maître dans le système.

La fonctionnalité DSP des microcontrôleurs à la rescousse

Les derniers microcontrôleurs pour les applications dédiées aux alimentations numériques contiennent une fonctionnalité DSP permettant à la boucle de contrôle numérique de s'exécuter en une fraction seulement de chaque période de commutation PWM. La figure 4 montre la période de commutation PWM d'une alimentation numérique typique. Dans cet exemple simple, la tension de sortie est échantillonnée une fois par cycle de commutation. Un temps de conversion du convertisseur A/N de quelques centaines de nanosecondes est typique pour un microcontrôleur conçu pour les applications d'alimentation numérique. Après la conversion CAN, la routine de service d'interruption est appelée pour exécuter le contrôleur à temps discret. Il s'agit d'une routine dans laquelle le temps est critique, c'est pourquoi le code du contrôleur peut être écrit en assembleur en utilisant directement les instructions MAC, et ainsi optimiser l'utilisation de chaque cycle d'instruction.

Comme le montre la figure 4, pour cet exemple, le temps que le microcontrôleur (MCU) ne passe pas à exécuter le contrôleur donne la bande passante disponible. Cette bande passante disponible peut être utilisée pour effectuer d'autres tâches ou fonctions spécifiques à une application client. Toutes les tâches de faible priorité sont exécutées dans une boucle lente et seront interrompues chaque fois que les tâches de haute priorité se produisent - comme l'interruption CAN pour exécuter le code de boucle de contrôle.

Possibilité de réutiliser le firmware

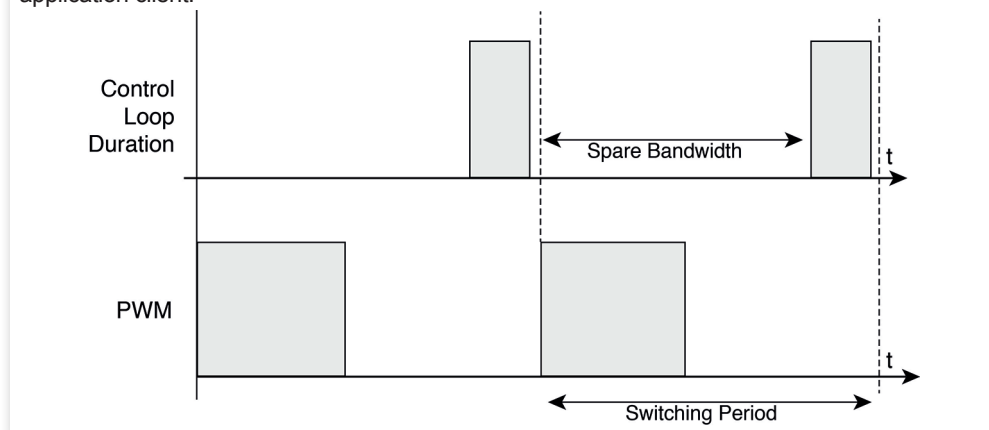
Le développement d'un firmware robuste et efficace pour une alimentation peut prendre beaucoup de temps en fonction de la complexité de la conception. A cela s'ajoutent le processus de vérification et d'essai ainsi que la documentation requise pour les diverses approbations de sécurité. Par conséquent, des ressources substantielles doivent être investies dans le développement d'une alimentation numérique. Cependant, une fois l'investissement initial effectué, l'un des avantages supplémentaires de l'alimentation numérique est la possibilité de réutiliser le firmware pour de nombreux produits différents. Par exemple, le changement de firmware pour des produits avec différentes tensions de

sortie assurent une surveillance en temps réel, un séquençage du rail d'alimentation ou un partage de courant précis entre les modules de sortie.

Certes, le microcontrôleur à haute performance utilisé pour une alimentation numérique sera plus coûteux que le circuit intégré analogique qu'il remplace. Cependant, le contrôleur numérique ouvre la possibilité d'implémenter d'autres fonctionnalités dans le MCU plutôt que d'utiliser des composants discrets. Cela peut conduire à une réduction du nombre de composants et à des solutions plus compactes, en particulier pour les conceptions présentant des exigences de signal complexes ou des rails d'alimentation multiples pouvant être contrôlés à l'aide d'un seul microcontrôleur. Le résultat peut être une

3 PÉRIODE DE COMMUTATION PWM D'UNE ALIMENTATION NUMÉRIQUE TYPIQUE

Comme montré ici, après la conversion CAN, la routine de service d'interruption est appelée pour exécuter le contrôleur à temps discret. Le temps que le microcontrôleur (MCU) ne passe pas à exécuter le contrôleur donne la bande passante disponible. Cette bande passante disponible peut être utilisée pour effectuer d'autres tâches ou fonctions spécifiques à une application client.



sortie dans une même série peut simplement consister à modifier des coefficients du contrôleur.

Compte tenu de la flexibilité qu'un microcontrôleur ajoute à la conception, la conversion de puissance numérique se prête bien aux applications d'alimentations personnalisées où les produits standard peuvent ne pas satisfaire toutes les exigences du client. Il peut y avoir des exigences de communications spécifiques telles que le contrôle de l'alimentation par un port USB, I2C ou EtherCAT combiné avec la possibilité de mettre à jour le protocole de communication à une date ultérieure, en utilisant une mise à jour du firmware. Le client peut exiger que la tension de sortie ou la limite de courant soient réglées à la volée ou néces-

solution globale plus rentable qu'une solution analogique lorsqu'elle est mise en œuvre en utilisant un microcontrôleur. Bien sûr, pour certaines exigences complexes, le passage au numérique peut être la seule solution. XP Power possède les connaissances et la capacité nécessaires pour mettre en œuvre des solutions d'alimentations personnalisées complexes en utilisant la diversité de notre gamme de produits standard. Avec un microcontrôleur au cœur de l'alimentation électrique, les possibilités d'applications de puissance personnalisées sont étendues. Compte tenu des nombreux avantages qu'il présente, nous assisterons probablement à une présence croissante du numérique dans la conversion d'énergie au cours des prochaines années. ■