

Utiliser des convertisseurs de puissance spécialisés pour combler l'écart 12 V à 48 V dans les systèmes automobiles

Auteur : Steven Keeping de Digi-Key

Avec l'ajout croissant d'électronique, de moteurs et d'actionneurs aux véhicules à moteur à combustion interne (ICE), le système électrique automobile conventionnel de 12 V en circuit fermé, basé sur une batterie plomb-acide chargée par l'alternateur, révèle ses limites. Par exemple, avec un système de 12 V, les applications haute puissance, comme la direction électrique, consomment un courant élevé, ce qui requiert des faisceaux de câbles plus volumineux et plus lourds. Ce poids supplémentaire devient important dans un véhicule moderne, qui peut comporter plusieurs kilomètres de câblage. Une autre approche consiste à utiliser des systèmes à plus haute tension pour les applications gourmandes en énergie afin de réduire la consommation de courant et d'alléger le câblage. Les implémentations commerciales présentent un réseau 12 V conventionnel, complété par un système de 48 V basé sur des batteries lithium-ion (Li-ion). Le système 12 V est utilisé pour des applications telles que la gestion du moteur, l'éclairage et le réglage des sièges et des portes, tandis que le système 48 V prend en charge les exigences intensives des fonctions telles que la direction électrique, le démarrage et la climatisation.

Ces systèmes électriques automobiles hybrides sont d'une complexité accrue et, par conséquent, posent de nouveaux défis en matière de conception. L'un des principaux défis est la gestion de la charge et de la décharge simultanées des deux circuits de batteries, y compris le dévoltage et le survoltage bidirectionnels entre les batteries.

Cet article décrit l'évolution des systèmes électriques automobiles 12 V/48 V doubles et explique les avantages des nouveaux systèmes. Il explore ensuite comment utiliser les régulateurs de tension bidirectionnels 12 V/48 V de Linear Technology et de Texas Instruments pour réduire la complexité de conception des systèmes à tension double. L'article aborde également les avantages d'une future topologie de véhicule décentralisée de 48 V uniquement, et présente un convertisseur de bus de Vicor adapté à un tel système.

Le défi de la transition à la conception 12 V/48 V

La transition vers des systèmes 12 V/48 V est largement motivée par la nécessité d'alimenter des équipements à forte consommation tout en veillant à ce que le véhicule continue à respecter des réglementations strictes en matière d'économie et d'émissions. Par exemple, le passage d'un entraînement mécanique à un entraînement électrique pour des éléments comme la direction ou les compresseurs réduit considérablement les pertes par friction et augmente les économies de carburant. Selon certains constructeurs automobiles, un système électrique de 48 V entraîne un gain de 10 à 15 % en termes d'économie de carburant, avec une réduction proportionnelle des émissions nocives. Le côté 12 V du système continue d'être requis en raison du grand nombre de dispositifs 12 V existants qui seront installés dans les voitures dans les années à venir.

La configuration 12 V/48 V se compose de deux branches distinctes : le bus 12 V traditionnel utilise une batterie plomb-acide classique pour les charges classiques, tandis que le système 48 V, alimenté par une batterie Li-ion, supporte les charges plus lourdes. Bien que deux circuits de charge séparés soient nécessaires pour s'adapter à l'électrochimie des batteries respectives, il doit y avoir un mécanisme qui permet à la charge de passer d'un circuit à l'autre sans risque d'endommager l'une ou l'autre batterie ou l'un des systèmes qu'elles alimentent. Il faut également un mécanisme permettant de fournir une puissance supplémentaire pour le rail de tension opposé en condition de surcharge. Une norme automobile récemment proposée — LV 148 — décrit la combinaison du bus 48 V avec le système automobile 12 V existant. Le système 48 V intègre un générateur de démarrage intégré (ISG) ou un générateur de démarrage à courroie et la batterie Li-ion. Le système est capable de fournir des dizaines de kilowatts (kW) et est destiné aux voitures conventionnelles, ainsi qu'aux véhicules électriques hybrides et semi-hybrides.

Le développement d'un système 12 V/48 V constitue un défi car il requiert une gestion minutieuse du transfert de puissance du rail 48 V du véhicule vers son rail 12 V et inversement. Une option consiste à utiliser un convertisseur abaisseur pour le dévoltage, tandis que le transfert de puissance dans le sens opposé peut être effectué par un convertisseur élévateur. Mais la conception de convertisseurs CC/CC séparés occupe un espace carte précieux et augmente le coût et la complexité du système. Une autre approche consiste à utiliser un seul convertisseur CC/CC abaisseur/élévateur bidirectionnel, placé entre les batteries 12 V et 48 V. Un tel convertisseur peut être utilisé soit pour charger les batteries, soit pour leur permettre de fournir du courant aux différentes charges électriques du véhicule (Figure 1).

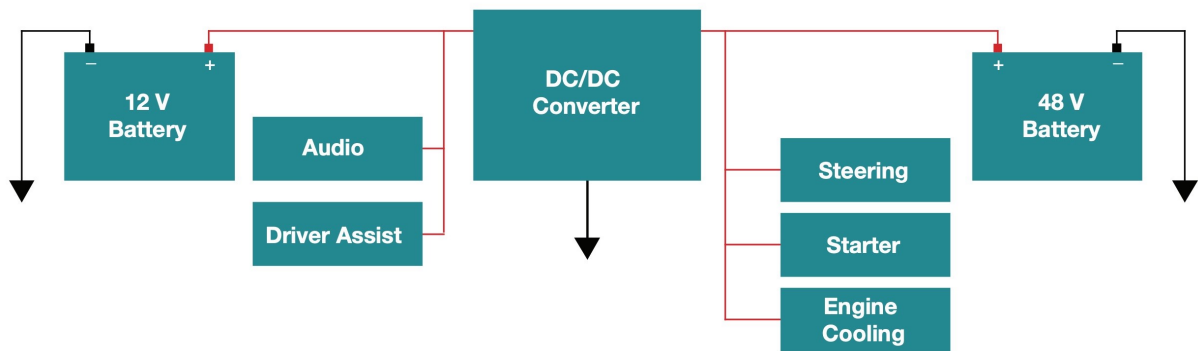


Figure 1 : Une alimentation bidirectionnelle peut être utilisée pour gérer l'alimentation entre les circuits 12 V et 48 V des systèmes électriques automobiles. (Source de l'image : Texas Instruments)

Contrôleurs de courant bidirectionnels

Les composants de gestion de l'alimentation pour les systèmes 12 V/48 V sont conçus pour répondre à la norme LV 148. Cela impose des exigences de surtension particulièrement élevées sur les puces. La norme prévoit que la tension maximum sur un rail de 48 V peut atteindre 70 Vs pendant au moins 40 millisecondes (ms), et que le système reste fonctionnel sans perte de performances lors d'un tel événement de surtension. Pour les fournisseurs de semi-conducteurs, cela signifie que tout composant connecté au rail de 48 V du véhicule doit résister à 70 Vs en entrée (plus une marge de sécurité, ce qui porte l'exigence globale à 100 Vs).

Le contrôleur abaisseur ou élévateur bidirectionnel synchrone 100 V à courant constant ou à tension constante LT8228 de Linear Technology (voir l'article technique de Digi-Key, Contrôle en mode courant et en mode tension pour la génération de signaux PWM dans les régulateurs à découpage CC/CC) avec un réseau de compensation indépendant, est un exemple d'alimentation bidirectionnelle conçue pour répondre aux spécifications LV 148.

Le contrôleur accepte deux entrées : V_1 , une alimentation de 24 V à 54 V de la batterie Li-ion ; et V_2 , une entrée de 14 V de la batterie plomb-acide (Figure 2). Les sorties sont de 48 Vs à 10 ampères (A) en mode élévateur et de 14 Vs à 40 A en mode abaisseur. La puce peut supporter 100 Vs sur les entrées et les sorties. Le mode de fonctionnement est contrôlé de manière externe à partir d'un microcontrôleur via la broche DRXN ou sélectionné automatiquement.

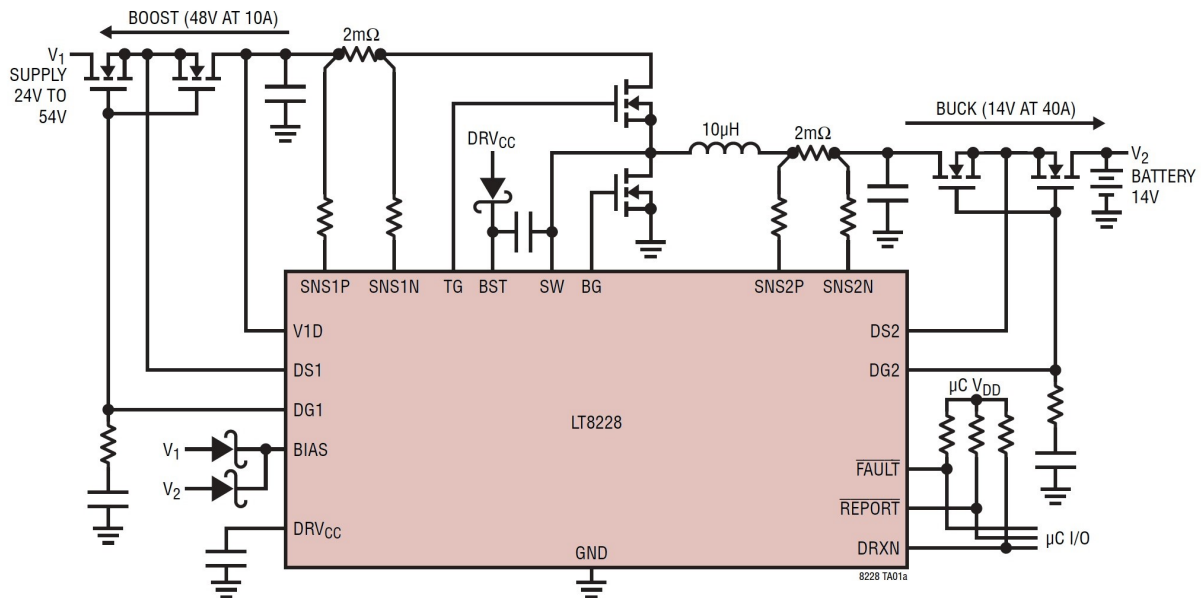


Figure 2 : L'alimentation bidirectionnelle LT8228 de Linear Technology fournit des tensions dévoltées ou survoltées de 100 V et répond aux spécifications LV 148. (Source de l'image : Linear Technology)

Les MOSFET d'entrée et de sortie protègent contre les tensions négatives, contrôlent les courants d'appel et assurent l'isolement entre les bornes en conditions de défaillance, telles que des courts-circuits de MOSFET de commutation. En mode abaisseur, les MOSFET de protection à la borne V_1 (entrée de 24 V à 54 V) empêchent le courant inverse. En mode élévateur, les mêmes MOSFET régulent le courant d'appel de sortie et utilisent un disjoncteur temporisé ajustable pour se protéger. Les rapports et les diagnostics de défaillances internes et externes sont disponibles via des broches dédiées.

Texas Instruments propose également un contrôleur de courant bidirectionnel à deux canaux hautes performances, conforme à la norme LV 148, le LM5170. Le dispositif gère le transfert de courant entre un port haute tension (connecté à la batterie Li-ion de 48 V) et un port basse tension (connecté à la batterie plomb-acide de 12 V). Des signaux d'activation indépendants activent chaque canal du contrôleur double.

Les amplificateurs de détection du courant différentiels à deux canaux et les moniteurs de courant de canal dédiés atteignent une précision typique de 1 %. Les circuits d'attaque de grille en demi-pont 5 A robustes sont capables de commander des commutateurs MOSFET en parallèle fournissant 500 W ou plus par canal. Le régulateur peut fonctionner en mode discontinu pour un meilleur rendement en conditions de faible charge (voir l'article technique de Digi-Key traitant de la différence entre les modes continu et discontinu du régulateur à découpage) et il prévient également le courant négatif. Les fonctionnalités de protection incluent la limite du courant de crête cycle par cycle, la protection contre la surtension des rails de batteries 48 V et 12 V, la détection et la protection contre les défaillances des commutateurs MOSFET, et la protection contre la surchauffe.

Le LM5170 utilise le contrôle en mode courant moyen, ce qui simplifie la compensation en éliminant le zéro du demi-plan droit en mode de fonctionnement élévateur et en maintenant un gain de boucle constant indépendamment des tensions de fonctionnement et du niveau de charge.

Les contrôleurs de courant bidirectionnels de Linear Technology et TI incluent des fonctions qui simplifient la conception des circuits de gestion de l'alimentation dans l'électronique automobile 12 V/48 V double. Par exemple, les composants permettent d'utiliser les mêmes composants d'alimentation externes, qu'il s'agisse de d'élever la tension à partir d'une batterie ou de l'abaisser à partir de l'autre. Cela permet d'économiser de l'espace, de réduire les coûts et de simplifier les circuits. Néanmoins, le choix de ces composants externes doit être fait avec soin.

Conception de circuits d'application

La sélection des composants externes lors de l'utilisation du LT8228 (ainsi que du dispositif de TI) suit généralement celle d'une conception correcte de régulateur à découpage. Par exemple, la fréquence de commutation (f_{sw}) et la valeur d'inductance (L) sont choisies pour optimiser le rendement, la taille

physique et le coût. De même, la résistance de détection du courant d'inductance, R_{SNS2} , ainsi que les résistances de gain d'entrée, R_{IN2} , sont sélectionnées pour la limite du courant d'inductance de crête, le rendement et la précision de détection du courant (Figure 3).

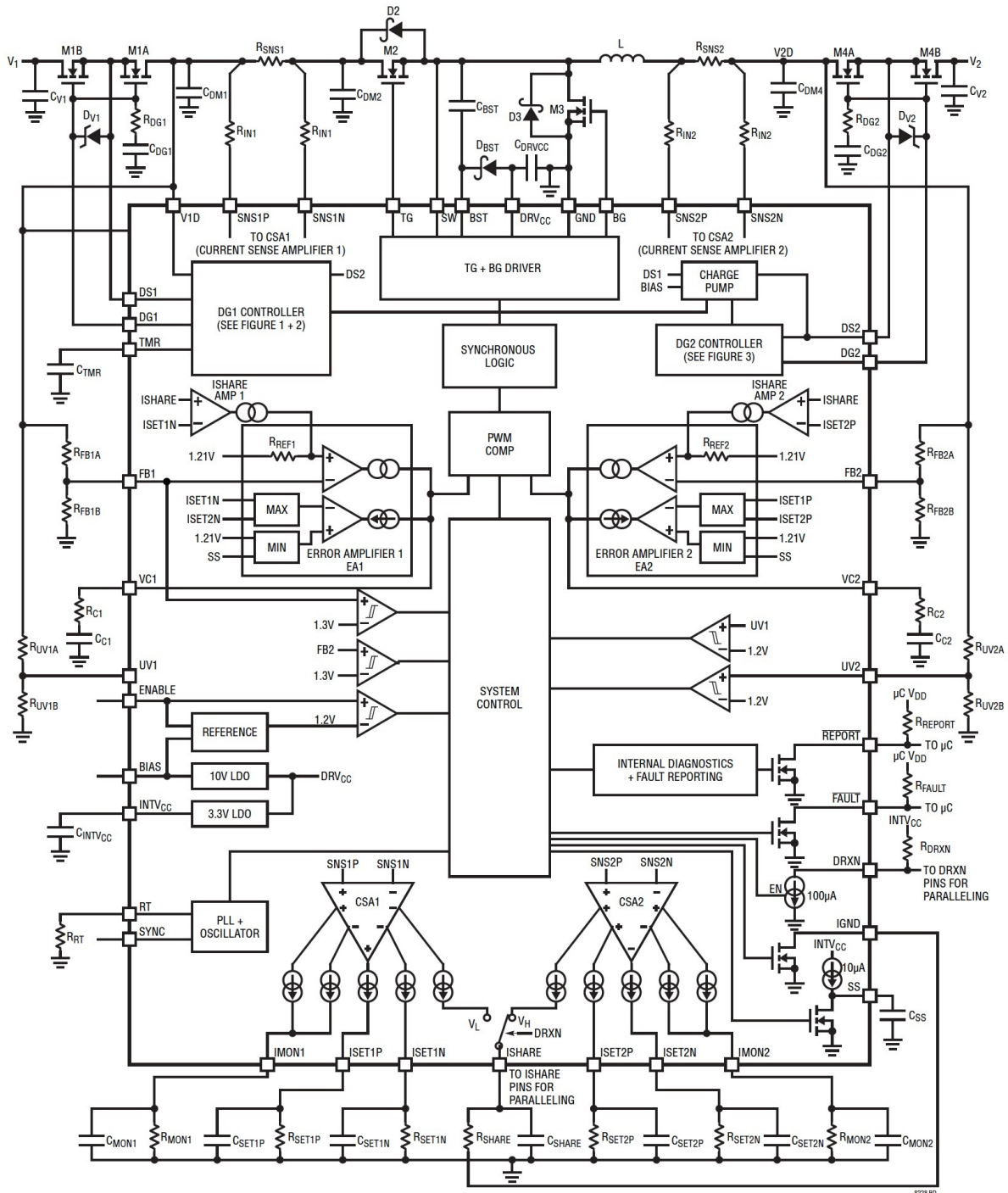


Figure 3 : Schéma fonctionnel du LT8228 de Linear Technology montrant les composants externes requis pour une application typique. (Source de l'image : Linear Technology)

Le condensateur C_{DM2} est choisi pour limiter la tension d'ondulation d'entrée dévoltée et de sortie survoltée ; de même, le condensateur C_{DM4} est choisi pour limiter la tension d'ondulation d'entrée survoltée et de sortie dévoltée. Le condensateur C_{DM1} à la broche V1D est utilisé pour contourner le bruit. Les condensateurs d'amortissement C_{V1} et C_{V2} sont sélectionnés avec leur valeur de résistance série équivalente (ESR) pour réduire la résonance due à l'inductance du fil série connecté à V_1 et

V₂ respectivement.

Les compensations pour les boucles de régulation de types abaisseur et élévateur sont choisies pour optimiser la largeur de bande et la stabilité. Pour en savoir plus sur la conception avec des contrôleurs et des régulateurs de tension à découpage, consultez les articles techniques de Digi-Key : Compromis de conception lors de la sélection d'un régulateur à découpage haute fréquence, Comprendre la réponse de la boucle de commande du régulateur à découpage et Utiliser des régulateurs à découpage à faibles EMI pour optimiser les conceptions d'alimentation haut rendement.

Après avoir sélectionné les composants pour répondre aux principes de conception corrects pour un régulateur à découpage, certains composants doivent être spécifiquement sélectionnés pour répondre aux exigences d'une application automobile bidirectionnelle 12 V/48 V.

Par exemple, la limite du courant de sortie abaisseur du LT8228, la limite du courant d'entrée élévateur et le moniteur de courant V₂ sont définis par les résistances R_{SET2P}, R_{SET2N} et R_{MON2} respectivement. Ensuite, la résistance de détection du courant V₁, R_{SNS1} (en haut à gauche sur le schéma) ainsi que les résistances de gain d'entrée R_{IN1} sont sélectionnées pour optimiser le rendement et la précision de détection du courant.

Le LT8228 utilise la même inductance pour le fonctionnement en modes abaisseur et élévateur. En mode abaisseur, le courant d'inductance est le courant de sortie V₂, et en mode élévateur, le courant d'inductance est le courant d'entrée V₂. Le courant d'inductance maximum dans chaque mode peut être calculé à partir des équations 1 et 2 :

Équations 1 et 2

$$I_{LMAXBUCK} = I_{V2P(LIM)} + \frac{1}{2} \frac{V_2 \cdot (V_{1(MAX)} - V_2)}{f \cdot L \cdot V_{1(MAX)}}$$
$$I_{LMAXBOOST} = I_{V2N(LIM)} + \frac{1}{2} \frac{V_2 \cdot (V_1 - V_2)}{f \cdot L \cdot V_1}$$

où f = fréquence de commutation

L = valeur de l'inductance sélectionnée

$I_{V2P(LIM)}$ = limite du courant de sortie V₂ en mode abaisseur

$I_{V2N(LIM)}$ = limite du courant d'entrée V₂ en mode élévateur

Le courant d'inductance de crête doit être au moins 20 à 30 % supérieur au courant d'inductance maximum plus élevé des modes abaisseur et élévateur. Cela garantit que la régulation du courant moyen maximum n'est pas affectée par la limite du courant d'inductance de crête dans l'un ou l'autre mode de fonctionnement. Le courant d'inductance est détecté en utilisant R_{SNS2} qui est placé en série avec l'inductance. Le courant d'inductance de crête $I_{L(PEAK)}$ est détecté lorsque I_{CSA2} atteint typiquement 72,5 µA.

Les valeurs élevées de R_{SNS2} (en haut à droite) améliorent la précision de détection du courant tandis que les faibles valeurs R_{SNS2} améliorent le rendement. Le concepteur doit sélectionner la valeur de R_{SNS2} de sorte que la tension de décalage de C_{SA2} n'affecte pas la précision de détection du courant, tout en minimisant la perte de puissance dans l'inductance. Une tension recommandée sur R_{SNS2} au courant d'inductance de crête est comprise entre 50 et 200 mV. Ensuite, le concepteur doit sélectionner R_{IN2} pour fixer la limite du courant d'inductance de crête selon la formule suivante :

Équation 3

$$R_{IN2} = \frac{I_{L(PEAK)} \cdot R_{SNS2}}{72.5\mu A}$$

Après avoir défini la limite du courant d'inductance de crête, la limite du courant de sortie élévateur, la limite du courant d'entrée abaisseur et le contrôleur de courant V_1 sont définis par les résistances R_{SET1N} , R_{SET1P} et R_{MON1} respectivement. Les condensateurs parallèles aux résistances R_{SET} sont choisis pour définir les limites du courant sur le courant moyen des résistances de détection du courant.

Les tensions de régulation et les seuils de surtension de $V1D$ (la sortie régulée en mode élévateur) et $V2D$ (la sortie régulée en mode abaisseur) sont définis en sélectionnant les diviseurs résistifs sur les broches FB1 et FB2. Le seuil de sous-tension de V_1 et V_2 est défini en sélectionnant les diviseurs résistifs sur les broches UV1 et UV2.

Le circuit externe du LT8228 requiert également six MOSFET de puissance (Figure 4). Ces derniers doivent être sélectionnés selon des considérations de rendement et de tension de claquage. Les diodes Schottky ($D2$ et $D3$) qui les accompagnent sont facultatives et doivent être choisies en fonction des considérations de rendement.

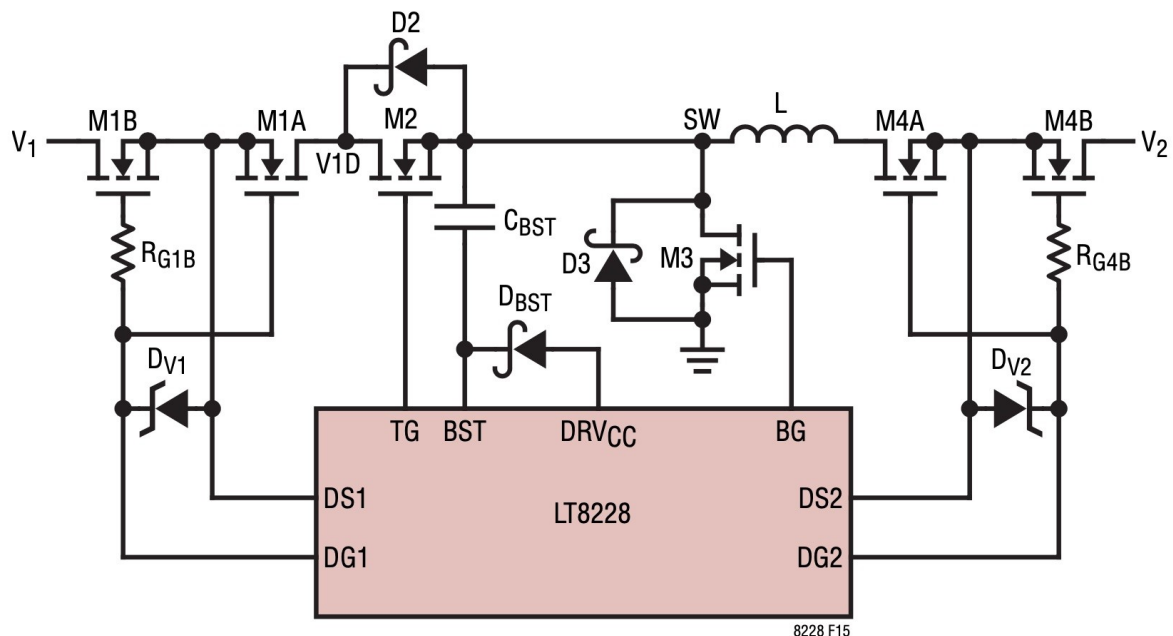


Figure 4 : Le LT8228 nécessite six MOSFET à canal N externes : MOSFET de protection V_1 M1A et M1B, MOSFET de protection V_2 M4A et M4B, MOSFET supérieur de commutation M2 et MOSFET inférieur de commutation M3. (Source de l'image : Linear Technology)

Lorsque le LT8228 fonctionne en mode abaisseur, le MOSFET de commutation M2 est le commutateur principal et le MOSFET M3 est le commutateur synchrone ; $V1D$ (le nœud à réguler par le régulateur élévateur et situé juste au-dessus et à gauche du contrôleur DG1 dans la Figure 3) est la tension d'entrée et $V2D$ (le nœud à réguler par le convertisseur abaisseur, en haut à droite de la Figure 3, juste à gauche des MOSFET abaisseurs) est la tension de sortie dévoltée régulée. En mode élévateur, la situation est inversée avec M3 agissant en tant que commutateur principal et M2 en tant que commutateur synchrone, avec $V2D$ comme tension d'entrée et $V1D$ comme tension de sortie. Pendant le temps d'arrêt, les deux MOSFET de commutation, M2 et M3, sont soumis à une tension d'entrée maximum (plus toute oscillations supplémentaires sur le nœud de commutation) via leur drain vers la source. Ainsi, le paramètre le plus important lors de la sélection des MOSFET de commutation dans les applications haute tension est la tension de claquage (BV_{DSS}).

Le concepteur doit également tenir compte de la dissipation de puissance des MOSFET. Une

dissipation excessive nuit au rendement du système et peut entraîner une surchauffe et endommager les MOSFET. Les paramètres clés pour déterminer la dissipation de puissance sont la résistance à l'état passant ($R_{DS(ON)}$), la tension d'entrée, la tension de sortie, le courant de sortie maximum et la capacité Miller (C_{MILLER}).

Élimination de la batterie de 12 V

La maturité et la fiabilité des systèmes basés sur une batterie plomb-acide de 12 V font qu'ils ne disparaîtront pas de sitôt. Mais les constructeurs automobiles travaillent déjà sur des systèmes pour de nouveaux véhicules permettant un fonctionnement complet à partir de 48 Vs (en utilisant des batteries fournissant de 48 Vs à 800 Vs). Ces systèmes utilisent des convertisseurs bidirectionnels non isolés, capables de gérer plusieurs kilowatts de puissance et de fournir une alimentation à la fois aux dispositifs électriques 12 V conventionnels et aux unités à plus haute tension.

Un exemple d'un tel convertisseur est le NBM2317S60E1560T0R de Vicor, un convertisseur non isolé haut rendement fonctionnant à partir d'un bus de tension haut potentiel de 38 V à 60 V pour fournir une tension bas potentiel de 9,5 Vs à 15 Vs. Le dispositif offre une puissance de sortie continue maximum de 800 W avec une capacité de puissance de crête jusqu'à 1 kW. En fonctionnement abaisseur, le courant de sortie est de 60 A, continu et de 100 A, transitoire ; en fonctionnement élévateur, les chiffres sont de 15 A, continu et de 25 A, transitoire. La densité de puissance du dispositif est de 274 W par centimètre cube (W/cm^3). Le rendement de crête est spécifié à 97,9 %.

Le dispositif mesure 23 mm x 17 mm x 7,5 mm, et occupe moins d'espace que les solutions de commutation plus lentes (inférieures à 1 mégahertz (MHz)). Le nombre de composants externes requis est réduit car le convertisseur ne nécessite pas de filtres externes ou de condensateurs de masse. Il n'y a pas non plus d'exigence de remplacement à chaud ou de limitation du courant d'appel.

Un moyen de mettre en œuvre une architecture 12 V/48 V alimentée par une seule batterie de 48 V consiste à utiliser une topologie centralisée. Cette topologie repose sur un seul convertisseur bidirectionnel haute capacité. Un tel système présente plusieurs inconvénients, notamment des problèmes de gestion thermique, l'absence de redondance intégrée, ainsi que le coût et le poids des faisceaux de câblage étendus nécessaires pour les applications à fort courant/basse tension (12 V).

Le dispositif de Vicor est conçu pour répondre à ces problèmes en facilitant une architecture décentralisée pour un système électrique de 12 V/48 V. La redondance est intégrée grâce à l'utilisation de convertisseurs multiples et les faisceaux 12 V peuvent être réduits et donc, rendus beaucoup plus légers. En outre, le défi de la gestion thermique est considérablement réduit. Par exemple, dans un système centralisé, un seul convertisseur fournissant une puissance de 3 kW et fonctionnant à un rendement de 95 % devra dissiper 150 W, en grande partie sous forme de chaleur. En comparaison, chacun des convertisseurs d'un système distribué comprenant quatre dispositifs produisant 750 W avec un rendement de 95 % dissipe 37,5 W. Alors que les pertes globales restent les mêmes, la température de chaque convertisseur est considérablement réduite (Figure 5).

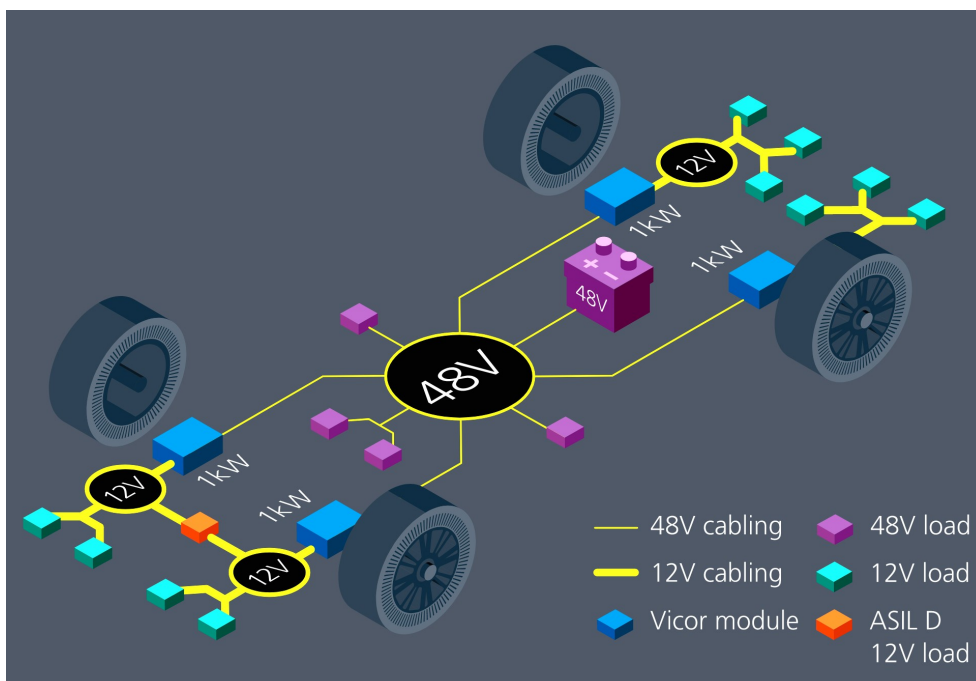


Figure 5 : Les convertisseurs CC/CC haut rendement tels que le NBM2317S60E1560T0R de Vicor permettent d'obtenir un système électrique automobile de 12 V/48 V alimenté par une seule batterie de 48 V. Dans la topologie décentralisée présentée ici, les problèmes de gestion thermique sont atténués et le câblage 12 V est réduit, ce qui permet de diminuer le poids. (Source de l'image : Vicor)

Vicor simplifie la vie des concepteurs souhaitant expérimenter la conception de systèmes 12 V/48 V en introduisant la carte d'évaluation NBM2317D60E1560T0R pour ses circuits intégrés de ligne NBM2317. La carte est fournie pré-configurée dans une topologie de type abaisseur avec une entrée de 38 V à 60 V et une seule sortie non isolée de 13,5 V.

Conclusion

Avec la prolifération des systèmes électriques dans les véhicules modernes, le système électrique 12 V traditionnel est en difficulté. L'introduction d'un système alternatif de 48 V offre une plus grande puissance pour faire fonctionner des systèmes tels que la direction électrique et la compression, tout en diminuant le poids et le coût des faisceaux de câbles. Toutefois, il est peu pratique de passer à un système 48 V unique à court terme en raison du volume des anciens produits 12 V utilisés dans les véhicules. La solution consiste à faire fonctionner ensemble des systèmes 12 V et 48 V, chacun avec sa propre batterie.

La gestion de l'alimentation et de la charge de ces différents systèmes de tension peut être complexe si des convertisseurs CC/CC distincts sont utilisés pour chacun. L'introduction de convertisseurs CC/CC bidirectionnels, pouvant agir en tant que pont entre les systèmes 12 V et 48 V, simplifie la conception, réduit les coûts et favorise l'adoption dans des véhicules moins chers.

Lectures recommandées :

1. Contrôle en mode courant et en mode tension pour la génération de signaux PWM dans les régulateurs à découpage CC/CC
2. Différence entre les modes continu et discontinu du régulateur à découpage
3. Compromis de conception lors de la sélection d'un régulateur à découpage haute fréquence
4. Comprendre la réponse de la boucle de commande du régulateur à découpage
5. Utiliser des régulateurs à découpage à faibles EMI pour optimiser les conceptions d'alimentation haut rendement