Choisir des régulateurs de tension pour charges de proximité puissants, évolutifs, performants, thermiquement optimisés et compacts

Afshin Odabaee
Responsable Division Opérationnelle, Modules d'alimentation
Linear Technology, faisant partie d'Analog Devices

L'art de concevoir des convertisseurs CC/CC efficaces et compacts est l'apanage d'un groupe très spécifique d'ingénieurs, parfaitement au fait de la physique et des mathématiques liées à la conversion de tension, et dotés d'une solide expérience pratique. En effet, concevoir des convertisseurs CC/CC élégants nécessite une bonne compréhension des diagrammes de Bode, des équations de Maxwell et des questions de pôles et de zéros en analyse complexe. Néanmoins, les concepteurs de circuits intégrés évitent fréquemment la confrontation avec le domaine redouté de la dissipation thermique, aspect généralement confié aux ingénieurs chargés de la conception des boîtiers.

La chaleur est une problématique importante des convertisseurs pour charges de proximité, car les circuits intégrés sont sensibles et très proches. Un régulateur pour charges de proximité génère de la chaleur, car aucune conversion de tension n'est efficace à 100 % (jusqu'à ce jour). Quelle température un boîtier peut-il atteindre du fait de sa construction, de son implantation et de son impédance thermique ? L'impédance thermique du boîtier contribue non seulement à l'augmentation de la température du régulateur, mais aussi à celle du circuit imprimé et des composants environnants, ajoutant ainsi à la complexité, aux dimensions et au coût des dispositifs de dissipation thermique.

La limitation de l'impact thermique d'un boîtier de convertisseur CC/CC pour circuit imprimé fait appel à deux stratégies essentielles :

Diffuser la chaleur par le biais de la carte à circuit imprimé : Si le circuit intégré convertisseur utilise la technologie de montage en surface, les vias et les couches de cuivre qui conduisent la chaleur dans le circuit imprimé la dissipent à partir de la partie inférieure du boîtier. Si l'impédance thermique entre le boîtier et le circuit imprimé est suffisamment faible, cette méthode suffit.

Contribuer à la circulation de l'air : la circulation d'un air plus froid permet d'éliminer la chaleur du boîtier (ou plus précisément, de transférer la chaleur vers les molécules d'air plus froides en contact avec la surface du boîtier).

Il existe bien entendu des méthodes de dissipation thermique passives et actives, qui, pour des raisons de simplicité, seront assimilées à la deuxième catégorie.

Concernant la montée en température des composants, le concepteur de cartes à circuit imprimé a à sa disposition tous les outils standard de limitation thermique : ajouter des pistes de cuivre, des dissipateurs thermiques ou des ventilateurs plus grands et plus rapides. Il peut aussi jouer sur l'espace, c'est-à-dire accroître la surface du circuit imprimé et augmenter la distance entre composants, ou épaissir les couches du circuit imprimé.

Si ces solutions permettent de maintenir le système dans des limites de température sécurisées, elles réduisent cependant la compétitivité du produit sur le marché. Prenons l'exemple d'un routeur. Pour assurer l'éloignement des composants sur le circuit imprimé, il sera peut-être nécessaire d'opter pour un boîtier plus volumineux. Dans le cas contraire, il sera nécessaire d'ajouter des ventilateurs plus rapides pour augmenter la circulation d'air, mais au prix d'un produit plus bruyant. Le produit final pourra s'avérer moins performant sur un marché où les entreprises sont en concurrence sur des critères comme la compacité, la puissance de traitement, le débit des données, l'efficacité et le coût.

Concernant les régulateurs de puissance pour charges de proximité, une bonne gestion thermique nécessite de choisir le bon régulateur, et donc, une étude soigneuse. Cet article décrit précisément les critères de choix d'un

régulateur pour simplifier la démarche d'un concepteur de cartes.

La densité de puissance n'est pas, à elle seule, un critère suffisant

La nécessité d'améliorer les performances thermiques des équipements électroniques repose sur un certain nombre de facteurs relatifs au marché. Premier constat évident : les performances augmentent sans cesse alors que les produits se miniaturisent de plus en plus. Par exemple, les appareils digitaux utilisant les technologies 28 nm–20 nm, voire moins, consomment l'énergie nécessaire à leur fonctionnement, et parallèlement, les concepteurs innovants d'équipements utilisent ces processus de miniaturisation pour obtenir des appareils à la fois plus rapides, plus petits, plus silencieux et plus efficaces. La conclusion apparemment évidente de cette tendance est que les régulateurs pour charges de proximité doivent gagner en densité de puissance, suivant les rapports (puissance)/(volume) ou (puissance)/(surface).

Il n'est donc nullement surprenant que la densité de puissance soit souvent citée dans la documentation relative aux régulateurs comme une spécification essentielle. Une densité de puissance remarquable permet de distinguer un régulateur parmi les autres, et les concepteurs ont ainsi à leur disposition un critère digne d'intérêt pour choisir un composant parmi les innombrables régulateurs disponibles. Un régulateur offrant une densité de puissance de 40 W/cm^2 est nécessairement plus performant qu'un autre qui n'atteint que 30 W/cm^2.

Ainsi, les concepteurs de produits veulent intégrer des puissances toujours plus importantes dans des espaces de plus en plus réduits. À l'instar de la comparaison avec la puissance des automobiles qui s'exprime en chevaux, l'affichage de densités de puissance extrêmes apparaît au premier regard comme une preuve patente de produits plus rapides, plus petits, plus silencieux et plus efficaces. Pour autant, quelle est l'importance de la densité de puissance pour la conception d'une solution performante ? Peut-être moins que vous ne l'imaginez.

Un régulateur pour charges de proximité doit tout simplement répondre aux exigences de l'application à laquelle il se rapporte. Pour le choisir, il est nécessaire de s'assurer de sa capacité à remplir sa fonction sur la carte à circuit imprimé. Dans ce contexte, la prise en compte des aspects thermiques peut rendre possible ou non l'application. Le processus de sélection étape par étape recommandé ici met en avant la priorité donnée aux performances thermiques d'un régulateur pour charges de proximité :

Ne pas tenir compte des chiffres de densité de puissance : les spécifications de densité de puissance ne prennent pas en compte le plafonnement des performances lié aux aspects thermiques, qui a un effet significativement plus important sur la « densité de puissance » réelle.

Vérifier les courbes de plafonnement des performances du régulateur lié aux aspects thermiques : un régulateur pour charges de proximité bien documenté et caractérisé doit être proposé avec des graphiques indiquant le courant de sortie pour différentes tensions d'entrée, tensions de sortie et vitesses de circulation d'air. La fiche technique doit indiquer le courant de sortie du régulateur dans des conditions de fonctionnement réelles, ce qui vous permettra de juger de ses capacités en matière de dissipation thermique et de courant de charge. Répond-il aux exigences de température ambiante nominale et maximale, et de vitesse de circulation d'air de votre système ? Gardez à l'esprit que le plafonnement des performances pour le courant de sortie est lié aux performances thermiques de l'appareil. Les deux facteurs sont étroitement liés, et tout aussi importants l'un que l'autre.

Prenez en compte l'efficacité : oui, l'efficacité *n'est pas le premier élément* à considérer. Si elle est seule prise en compte, l'efficacité peut conduire à une perception inexacte des caractéristiques thermiques d'un régulateur CC/CC. Bien entendu, les chiffres d'efficacité sont nécessaires pour calculer le courant d'entrée et de charge, la consommation d'énergie en entrée, la dissipation de puissance et la température de jonction. Cependant, l'efficacité doit être combinée avec le plafonnement du courant de sortie et les autres données thermiques relatives au composant et à son boîtier.

Par exemple, un convertisseur abaisseur CC/CC d'une efficacité de 98 % est remarquable, et c'est encore mieux s'il affiche un chiffre de densité de puissance supérieur. L'achèteriez-vous par rapport à un régulateur caractérisé par une efficacité et une densité de puissance moindres ? Un ingénieur compétent devrait se poser la question de l'effet de cette perte d'efficacité apparemment insignifiante de 2 %. Comment cette puissance se traduit-elle en montée de température du boîtier en cours de fonctionnement ? Quelle est la température de jonction d'un régulateur efficace bénéficiant d'une forte densité de puissance à une température ambiante de 60 °C et d'une circulation d'air de 200 pieds linéaires par minute ? Poussez votre analyse au-delà des valeurs nominales pour des températures ambiantes de 25 °C. Quelles sont les valeurs maximales et minimales mesurées aux extrêmes, pour – 40 °C, 85 °C ou 125 °C ? Pour des densités de puissance élevées, l'augmentation de l'impédance thermique du boîtier conduit-elle à une température de jonction largement supérieure à la température de fonctionnement sécurisé ? Quel est le degré de plafonnement des performances nécessaire pour un régulateur extrêmement efficace, mais coûteux ? Les valeurs de courant de sortie plafonnées réduisent-elles la puissance de sortie au point que le surcoût du composant n'est plus justifié ?

Prendre en compte la simplicité du refroidissement du régulateur pour charges de proximité : les valeurs d'impédance thermique du boîtier indiquées dans la fiche technique sont essentielles pour simuler et calculer l'augmentation de la température ambiante, de la jonction et du boîtier. L'essentiel de la chaleur d'un boîtier pour montage en surface circule entre la partie inférieure du boîtier et la carte à circuit imprimé. Les recommandations d'implantation et les questions relatives aux mesures thermiques doivent figurer dans la fiche technique pour minimiser les surprises lors de la réalisation du prototype du système.

Un boîtier bien conçu doit dissiper efficacement la chaleur uniformément sur l'ensemble de ses surfaces, en éliminant les points chauds qui sapent la fiabilité d'un régulateur. Comme décrit précédemment, la carte à circuit imprimé a pour rôle d'absorber et d'acheminer l'essentiel de la chaleur émise par les régulateurs montés en surface. Mais avec la prépondérance de la circulation d'air forcé dans les systèmes denses et complexes d'aujourd'hui, un régulateur pour charges de proximité bien conçu doit également profiter de cette opportunité de refroidissement « gratuite » qui permet d'éliminer la chaleur générée, notamment, par les transistors MOSFET et les inductances.

Guider la chaleur vers la partie supérieure du boîtier et dans l'air

Un régulateur à découpage de puissance pour charges de proximité dépend d'une inductance ou d'un transformateur pour convertir la tension d'alimentation d'entrée en tension de sortie régulée. Dans un régulateur abaisseur non isolé, le composant utilise une inductance. L'inductance et les éléments de découpage associés, notamment les transistors MOSFET, produisent de la chaleur au cours de l'opération de conversion CC/CC.

Il y a une dizaine d'années, une nouvelle évolution des boîtiers a permis de concevoir et d'intégrer dans des boîtiers en matière plastique moulée, appelés modules ou SiP, l'intégralité d'un circuit régulateur CC/CC, y compris les composants magnétiques. L'essentiel de la chaleur générée à l'intérieur de ces boîtiers a ainsi été acheminé vers la carte à circuit imprimé via la partie inférieure du boîtier. Toutes les approches classiques pour améliorer l'élimination de la chaleur du boîtier contribuent à des dimensions plus importantes, notamment lorsqu'il s'agit de fixer un dissipateur thermique au-dessus du boîtier à montage en surface.

Il y a quelques années, une technique innovante de fabrication de boîtiers modulaires a été développée pour tirer parti du flux d'air disponible pour faciliter le refroidissement. Dans ce type de boîtier, un dissipateur thermique est intégré au boîtier modulaire et surmoulé. À l'intérieur du boîtier, la partie inférieure du dissipateur thermique est directement reliée aux transistors MOSFET et aux inductances, sources de chaleur, alors que la partie supérieure du dissipateur thermique est constituée d'une surface plane exposée dans la partie haute du boîtier. Cette nouvelle technique de dissipation thermique interne au boîtier permet de refroidir rapidement un composant grâce à la circulation de l'air (voir, par exemple, les vidéos TechClip du LTM4620, www.linear.com/solutions/4936).

Structure Verticale : Régulateur modulaire pour charges de proximité avec une inductance superposée servant de dissipateur thermique

La taille d'une inductance dans un régulateur pour charges de proximité dépend de la tension, de la fréquence de découpage, du courant à traiter et de sa construction. Dans une approche modulaire, où le circuit CC/CC incorporant l'inductance est surmoulé et encapsulé dans un boîtier en matière plastique semblable à un circuit intégré, c'est l'inductance qui fixe l'épaisseur, le volume et le poids du boîtier par rapport aux autres composants. L'inductance est également une source importante de chaleur.

Intégrer le dissipateur thermique dans le boîtier, comme indiqué plus haut, facilite la conduction de la chaleur entre les transistors MOSFET et l'inductance vers la partie supérieure du boîtier, où elle peut être dissipée dans l'air, à l'aide d'une plaque froide ou d'un dissipateur thermique passif. Cette technique est efficace lorsqu'il est possible d'intégrer facilement des inductances de petite dimension et à faible intensité de courant à l'intérieur du boîtier en matière plastique. Cependant, cette approche est moins efficace lorsque les régulateurs dépendent d'inductances plus volumineuses aux courants plus élevés, où l'implantation des composants magnétiques à l'intérieur du boîtier impose de les écarter des autres, ce qui contribue significativement à l'encombrement du boîtier sur le circuit imprimé. Pour maintenir des dimensions limitées tout en améliorant la dissipation thermique, les ingénieurs chargés de la conception du boîtier ont développé une approche de superposition verticale, ou 3D (Figure 1).

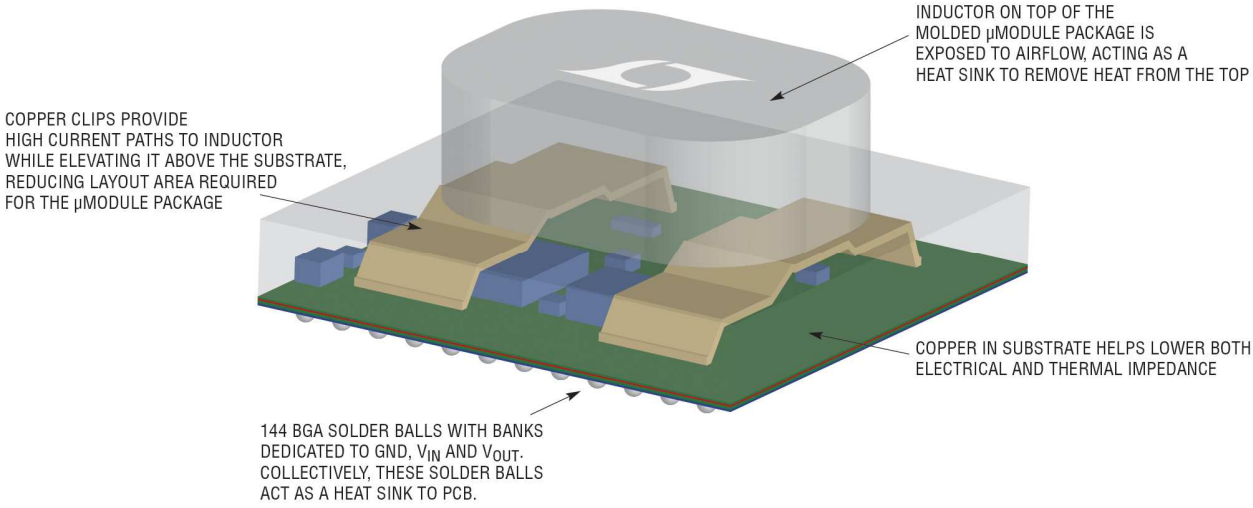


Figure 1. Le module régulateur pour charges de proximité de puissance utilise une technologie de boîtier 3D (implantation verticale) pour surélever l'inductance et l'exposer comme un dissipateur thermique à la circulation de l'air. Les autres circuits CC/CC sont assemblés sur le substrat sous l'inductance, ce qui limite au minimum la surface de circuit imprimé occupée tout en améliorant les performances thermiques.

Boîtier 3D avec exposition de l'inductance superposée : Maintenir un faible encombrement, accroître la puissance et améliorer la dissipation thermique

Réduire l'encombrement sur la carte à circuit imprimé, gagner en puissance et améliorer les performances thermiques – ces trois objectifs peuvent être atteints simultanément grâce au boîtier 3D, nouvelle méthode de construction des régulateurs pour charges de proximité (Figure 1). Le LTM4636 est un régulateur µModule® comprenant un régulateur CC/CC intégré, des transistors MOSFET, des circuits fonctionnels et une forte inductance pour diminuer l'ondulation de sortie. Il génère des courants atteignant 40 A à partir d'une entrée 12 V et produit des tensions de sortie régulées comprises entre 3,3 V et 0,6 V. Quatre composants LTM4636 fonctionnant en parallèle peuvent générer simultanément jusqu'à 160 A de courant de charge. Les dimensions du boîtier sont à peine de 16 mm × 16 mm. Autre régulateur de la gamme, le LTM4636-1 détecte les températures excessives et les conditions de surtension sur les entrées et les sorties et peut déclencher une alimentation amont ou un coupe-circuit pour se protéger, lui et sa charge.

Les fervents de puissance peuvent calculer la densité de puissance du LTM4636, et vanter sans retenue ses chiffres impressionnants. Cependant, comme indiqué précédemment, la densité de puissance n'est pas un critère suffisant à lui seul. Le régulateur µModule apporte en effet d'autres atouts significatifs aux concepteurs de systèmes : une performance thermique supérieure liée à son efficacité de conversion CC/CC et des capacités de dissipation thermique inégalées.

Pour minimiser l'encombrement du régulateur (16 mm × 16 mm, format BGA), l'inductance est surélevée et fixée sur deux structures de châssis conductrices en cuivre pour pouvoir souder les autres composants du circuit (diodes, résistances, MOSFET, condensateurs, circuit intégré CC/CC) au-dessous, sur le substrat. Si l'inductance est placée sur le substrat, le régulateur µModule peut facilement occuper plus de 1 225 mm^2 sur le circuit imprimé, au lieu de ses 256 mm^2 en version superposée.

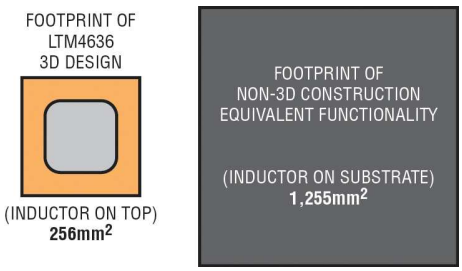


Figure 2. L'inductance superposée du LTM4636 double les capacités de dissipation thermique pour obtenir des performances thermiques exceptionnelles dans une solution complète d'alimentation pour charges de proximité dans un faible encombrement.

La construction par superposition d'une inductance a pour avantage d'offrir aux concepteurs de systèmes un régulateur compact aux performances thermiques supérieures. L'inductance superposée du LTM4636 n'est pas surmoulée (encapsulée) dans une matière plastique comme le reste des composants. Elle est au contraire directement exposée à l'air. La forme du boîtier de l'inductance comporte des angles arrondis pour améliorer l'aérodynamique (résistance minimale à la circulation de l'air).

Performance thermique et efficacité

Le LTM4636 est un régulateur µModule produisant 40 A doté de la technologie de boîtier 3D, ou CoP (component-on-package) comme l'indique la Figure 1. Le corps du boîtier est formé d'un surmoulage de 16 mm × 16 mm × 1,91 mm BGA. L'inductance étant superposée à la section moulée, la hauteur totale du LTM4636, entre la partie basse des billes de soudure BGA (144 au total) et le haut de l'inductance, est de 7,16 mm.

Outre la dissipation thermique par le dessus, le LTM4636 est conçu pour dissiper efficacement la chaleur entre la partie basse du boîtier et la carte à circuit imprimé. Il comporte 144 billes de soudure BGA avec des bancs dédiés aux signaux GND (masse), V_{IN} (tension d'entrée) et V_{OUT} (tension de sortie) dans lesquels circulent des courants élevés. Collectivement, ces billes de soudure constituent un dissipateur thermique sur la carte à circuit imprimé. Le LTM4636 est optimisé pour dissiper la chaleur entre le haut et le bas du boîtier.

Même avec un taux de conversion significatif, une entrée 12 V/une sortie à 1 V, un courant à pleine charge de 40 A (40 W) et une circulation d'air standardisée à 200 pieds linéaires par minute, la température du boîtier LTM4636 n'atteint que 40 °C au-dessus de la température ambiante (25 °C – 26,5 °C). La Figure 4 ci-dessous représente l'image thermique du LTM4636 dans ces conditions.

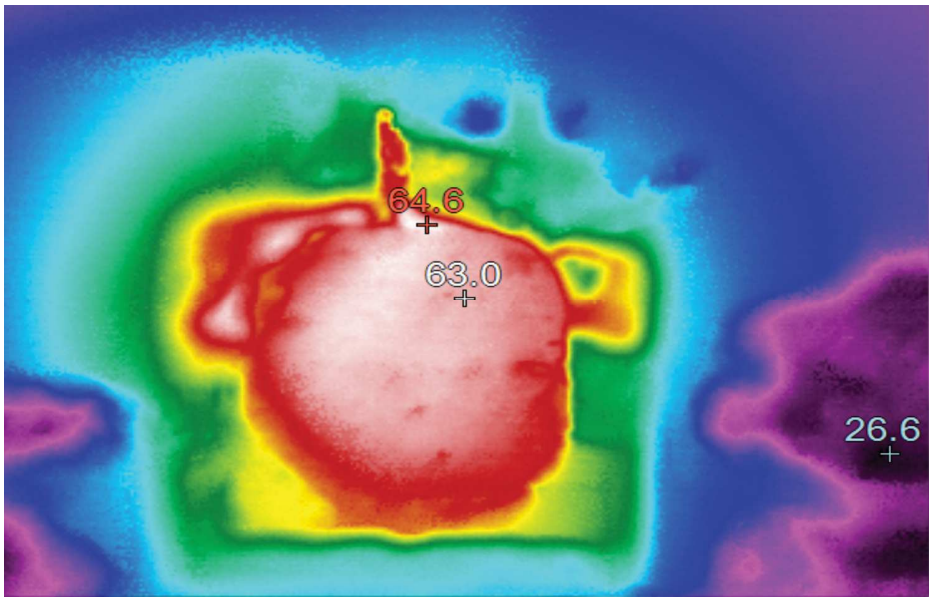


Figure 4. Les résultats du régulateur à 40 W en matière thermique montrent une augmentation de température de seulement 40 °C.

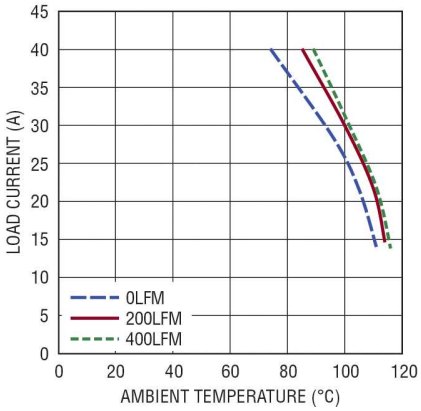


Figure 5. Le plafonnement des performances pour des raisons thermiques montre une capacité à générer une intensité de 40 A possible jusqu'à une température ambiante de 83 °C, avec une circulation d'air de 200 LFM.

La Figure 5 représente les résultats du plafonnement du courant de sortie en fonction des paramètres thermiques. Pour une circulation d'air à 200 pieds linéaires par minute, le LTM4636 produit un courant exceptionnel de 40 A jusqu'à une température ambiante de 83 °C. Un plafonnement à la moitié du courant, 20 A, ne se produit que dans le cas d'une température ambiante excessivement élevée de 110 °C. Le LTM4636 ne peut donc fonctionner à haute capacité que si un certain degré de circulation d'air est possible.

L'efficacité élevée de conversion représentée sur la Figure 6 résulte principalement des excellentes performances des transistors MOSFET et des robustes circuits d'attaque du LTM4636. Par exemple, un contrôleur CC/CC abaisseur utilisant une valeur d'alimentation d'entrée de 12 V permet d'obtenir les valeurs suivantes :

- 95 % pour une entrée de 12 V produisant une tension de 3,3 V, 25 A
- 93 % pour une entrée de 12 V produisant une tension de 1,8 V, 40 A
- 88 % pour une entrée de 12 V produisant une tension de 1 V, 40 A

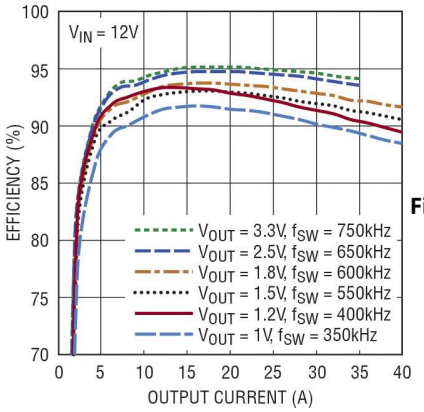


Figure 6. Efficacité élevée de conversion CC/CC pour différentes tensions de sortie.

Régulateur évolutif µModule pour charges de proximité 4 × 40 A, 140 W, avec équilibrage thermique

Un circuit LTM4636 permet de produire un courant de charge de 40 A nominal. Deux circuits LTM4636 en mode de répartition du courant (ou en parallèle) peuvent produire 80 A, et quatre circuits permettront d'obtenir une intensité de 160 A. Le passage à la puissance supérieure d'une alimentation avec des circuits LTM4636 connectés en parallèle est facile : il suffit de copier et coller l'implantation du régulateur unique, comme l'indique la Figure 7 (des symboles et des empreintes sont disponibles).

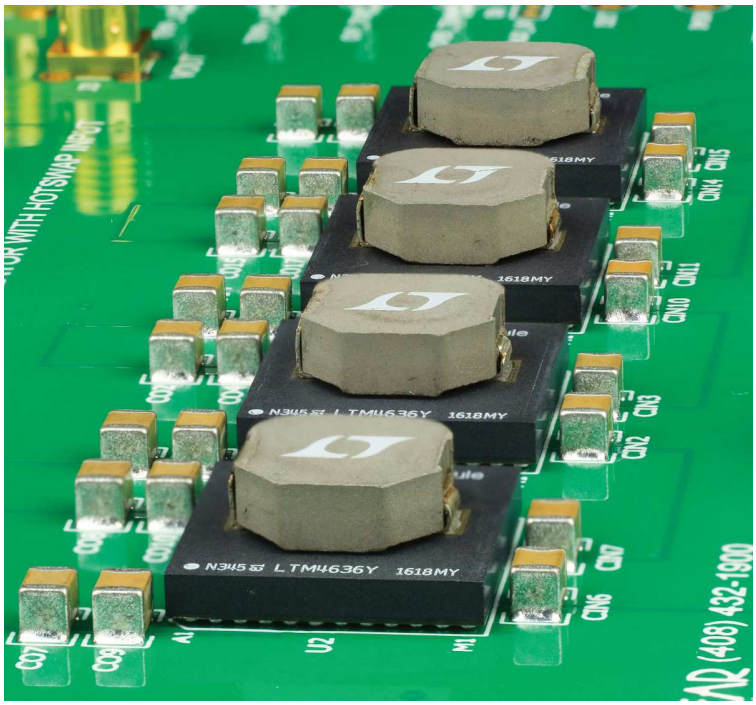


Figure 7. La mise en place des LTM4636 en parallèle est facile. Il suffit de reproduire l'implantation d'un seul canal.

L'architecture du mode de génération de courant du LTM4636 permet une répartition précise du courant pour les blocs de 40 A. En retour, cette répartition permet d'obtenir une alimentation capable de dissiper la chaleur de manière égale entre les composants. La Figure 8 indique que tous les composants du régulateur à quatre µModules pour une densité de 160 A fonctionnent avec un écart maximum de température de 1 °C les uns par rapport aux autres, ce qui permet de s'assurer qu'aucun d'entre eux, pris séparément, n'est en surcharge ou en surchauffe. Cet aspect simplifie considérablement la limitation de l'impact thermique.

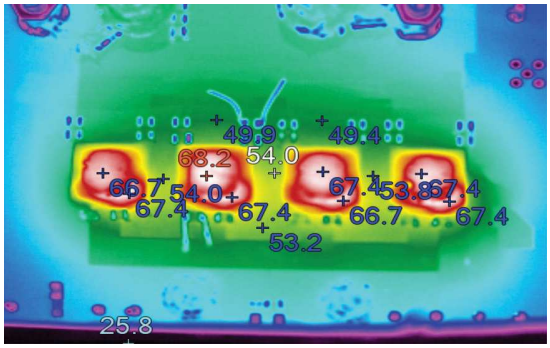


Figure 8. Répartition précise du courant pour quatre circuits LTM4636 fonctionnant en parallèle, conduisant à une augmentation de la température de seulement 40 °C pour une application générant 160 A.

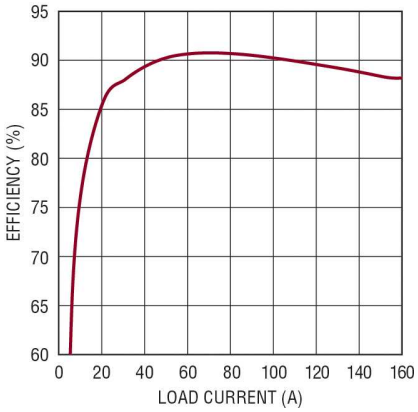
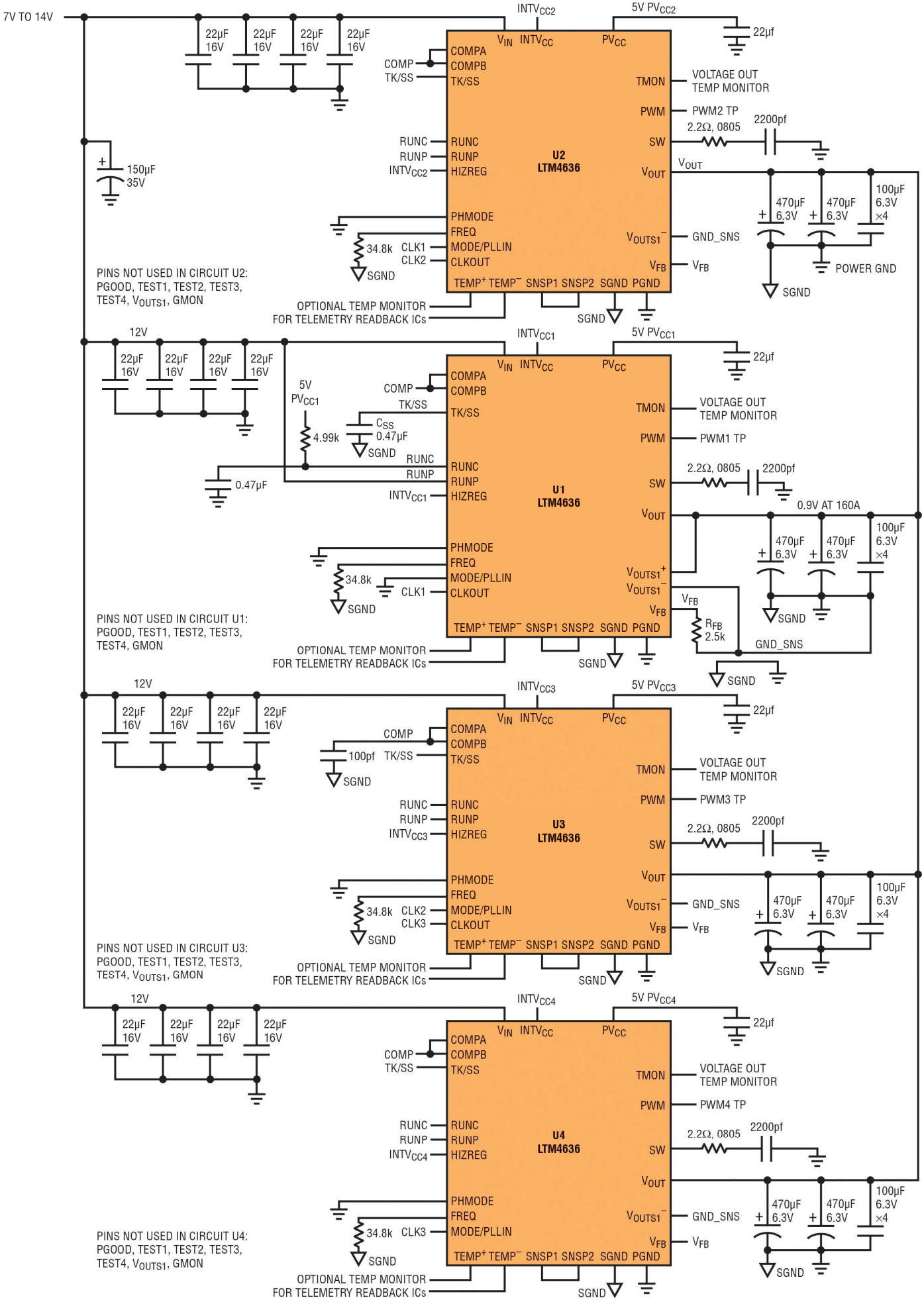


Figure 9. Efficacité des quatre régulateurs µModule d'une puissance de 140 W.

La Figure 10 représente l'ensemble complet générant 160 A. À noter qu'aucun composant d'horloge n'est nécessaire pour que les LTM4636 puissent fonctionner en déphasage les uns par rapport aux autres – l'horloge et la commande de phase sont intégrées. Un fonctionnement multiphase réduit le courant d'ondulation en sortie et en entrée, ce qui diminue le nombre de condensateurs d'entrée et de sortie nécessaires. Ici, les quatre LTM4636 représentés sur la Figure 10 fonctionnent avec un déphasage de 90 °.


7V TO 14V
22µF 16V
150µF 35V
INTVCC2
5V PVCC2
22µf
VIN INTVCC PVCC
COMPA
COMPB
TK/SS
COMP
TMON
VOLTAGE OUT TEMP MONITOR
PWM
PWM2 TP
2.2Ω, 0805
2200pf
RUNC
RUNP
INTVCC2
HIZREG
U2 LTM4636
SW
VOUT
470µF 6.3V
100µF 6.3V ×4
PHMODE
FREQ
MODE/PLLIN
CLKOUT
34.8k
CLK1
CLK2
SGND
VOUTS1−
GND_SNS
VFB
POWER GND
TEMP+ TEMP− SNSP1 SNSP2 SGND PGND
OPTIONAL TEMP MONITOR FOR TELEMETRY READBACK ICs
PINS NOT USED IN CIRCUIT U2: PGOOD, TEST1, TEST2, TEST3, TEST4, VOUTS1, GMON
12V
INTVCC1
5V PVCC1
4.99k
CSS 0.47µF
0.47µF
PWM1 TP
0.9V AT 160A
VOUTS1+
RFB 2.5k
CLK3
PINS NOT USED IN CIRCUIT U1: PGOOD, TEST1, TEST2, TEST3, TEST4, GMON
INTVCC3
5V PVCC3
100pf
U3 LTM4636
PWM3 TP
CLK2
PINS NOT USED IN CIRCUIT U3: PGOOD, TEST1, TEST2, TEST3, TEST4, VOUTS1, GMON
INTVCC4
5V PVCC4
U4 LTM4636
PWM4 TP
PINS NOT USED IN CIRCUIT U4: PGOOD, TEST1, TEST2, TEST3, TEST4, VOUTS1, GMON

Conclusion

Au-delà des valeurs nominales de tension et d'intensité du composant, choisir un régulateur pour charges de proximité pour un système à implantation très dense nécessite un soin particulier. L'évaluation des caractéristiques thermiques du boîtier est essentielle, car elle détermine le coût du refroidissement, le coût de la carte à circuit imprimé et la taille du produit final. Les évolutions d'implantation en 3D, avec superposition verticale, ou CoP, permettent d'installer des régulateurs de puissance modulaires pour charges de proximité en limitant l'encombrement sur la carte à circuit imprimé, mais plus important encore, avec un refroidissement efficace. Le LTM4636 est la première série de régulateurs µModule à bénéficier de cette technologie de superposition. Le régulateur µModule 40 A, équipé d'une inductance superposée jouant le rôle de dissipateur thermique, affiche une efficacité de 95 % à 88 %, avec une augmentation de la température de 40 °C à pleine charge, et des dimensions atteignant seulement 16 mm × 16 mm de surface occupée sur le circuit imprimé. Une description vidéo du LTM4636 est accessible à l'adresse : www.linear.com/LTM4636.