Contrôleur de diode idéale à faible courant I_Q avec protection contre l'inversion des polarités en entrée pour les solutions d'alimentation pour l'automobile et les télécommunications

Meilissa Lum, ingénieur concepteur, Produits signaux mixtes, Linear Technology Corp.

Les diodes de blocage sont largement utilisées dans les alimentations pour résoudre tout un éventail de problèmes. Dans les systèmes automobiles, une diode de blocage placée en série permet d'assurer une protection contre l'inversion des polarités lors du remplacement d'une batterie ou du démarrage d'une voiture avec des pinces à l'aide d'une batterie extérieure. De leur côté, les systèmes à haute disponibilité et de distribution des alimentations dans les télécommunications utilisent des diodes de blocage pour assurer la redondance des sources en connectant plusieurs alimentations en parallèle. Les diodes sont également utilisées pour éviter la décharge de condensateurs réservoirs lorsqu'il est nécessaire d'assurer le maintien temporaire d'une tension de sortie pour pallier une chute de tension en entrée ou des pics de bruit, ou pour assurer une mise hors service progressive lorsque l'alimentation d'entrée chute de manière soudaine.

S'il est facile de comprendre et d'appliquer le principe des diodes de blocage, leur chute de tension entraîne une dissipation d'énergie significative, ce qui les rend impropres pour les applications conjuguant basse tension et courant élevé. Pour les applications basse tension, la chute de tension directe devient un facteur limitant pour la plage de fonctionnement d'un circuit, même en cas d'utilisation d'une diode à barrière Schottky. La perte de marge sur l'alimentation aux bornes d'une diode série atteint au moins 500 mV, ce qui constitue une dégradation substantielle pour les systèmes automobiles en 12 V où l'alimentation peut descendre jusqu'à 4 V lors d'un démarrage à froid.

La chute de tension fixe des diodes atteignant 400 à 700 mV au minimum, et ce, quel que soit le courant nominal, la dissipation d'énergie devient un problème entre 1 A et 2 A pour les applications utilisant des circuits à montage en surface. Pour des intensités supérieures à 5 A, la dissipation d'énergie devient un problème majeur qui nécessite des implantations thermiques élaborées ou des dissipateurs coûteux pour le maintien de la diode à basse température. Les concepteurs de circuits ont donc besoin d'une solution plus efficace.

L'une d'entre elles consiste à remplacer les diodes par des commutateurs à transistor MOSFET. Le MOSFET est relié de sorte que sa diode de substrat (source-drain) pointe dans la même direction que la diode qu'il remplace. Cependant, en conduction directe, le MOSFET est passant, ce qui court-circuite la diode de substrat par un chemin à faible perte traversant le canal MOSFET. Lorsque le courant s'inverse, le MOSFET est bloqué, et la diode de substrat bloque la circulation du courant, ce qui préserve le fonctionnement de la diode. La chute de tension directe et la dissipation d'énergie sont réduites au moins d'un facteur 10. Il est ainsi possible d'obtenir une diode idéale par comparaison aux diodes p-n ou à barrière Schottky classiques.

Les circuits LTC4357 et LTC4359 sont des contrôleurs de diode idéale, conçus pour commander des MOSFET à canal N dans un large éventail d'applications de protection dans les situations d'inversion des polarités, de mise en parallèle et de maintien des alimentations. Il existe des MOSFET dont la résistance $R_{DS(ON)}$ à l'état passant atteint à peine 1 mΩ. Il est donc possible de construire des diodes idéales pour traiter des courants dépassant 50 A en utilisant un composant monopassage, tout en maintenant les pertes de tension et de puissance à des niveaux 10 fois plus faibles que les solutions à base de diodes.

Les contrôleurs LTC4357 et LTC4359 ont l'un et l'autre pour rôle de remplacer une diode, mais le second, le LTC4359, bénéficie d'un domaine de fonctionnement plus large avec une tension atteignant à peine 4 V, et son courant de repos est quatre fois plus faible que celui du LTC4357. La broche /SHDN du LTC4359 permet de réduire le courant de repos et fait du LTC4359 un commutateur de charge, fonction que le LTC4357 et les solutions utilisant des diodes ne possèdent pas. Le tableau 1 décrit les caractéristiques des contrôleurs LTC4357 et LTC4359.

Le LTC4359 est un contrôleur à faible courant de repos, caractérisé par une plage de fonctionnement étendue comprise entre 4 et 80 V. La valeur terminale de 4 V de la plage de fonctionnement est particulièrement importante pour les applications basse tension où la chute de tension liée à la diode est inacceptable, mais avec une tension maximale de 80 V qui permet un fonctionnement et une tenue aux transitoires dans les systèmes de télécommunications alimentés en 48V et les environnements automobiles. Le contrôleur LTC4359 protège les circuits aval contre toute inversion des polarités jusqu'à − 40 V, notamment en cas d'erreur de raccordement des bornes d'une batterie.

Lorsqu'un circuit est alimenté par batterie, il est essentiel, en fonctionnement normal, de minimiser le courant de décharge, et c'est même crucial lorsque la charge ne fonctionne pas. Le contrôleur LTC4359 bénéficie d'un faible courant de repos (155 µA nominal), qui peut même être ramené à 14 µA lorsque le circuit est à l'arrêt. Dans ce cas, bien que le MOSFET soit désactivé, sa diode de substrat continue à conduire dans le sens direct. Certaines applications nécessitent la possibilité d'activer ou désactiver une charge ou de contrôler la mise en œuvre d'une alimentation indépendante de la tension d'alimentation standard. C'est ce que permet le LTC4359 en attaquant deux MOSFET à canal N pour constituer un commutateur de charge et bloquer le courant direct et le courant inverse.

Mode de fonctionnement

Le LTC4359 contrôle un transistor MOSFET à canal N, représenté par Q1 dans le schéma de principe de la figure 1. La source du MOSFET est reliée à l'alimentation d'entrée et joue le rôle de l'anode de la diode. Le drain constitue la cathode. Lorsque l'alimentation est appliquée initialement, le courant de charge circule dans la diode de substrat du MOSFET. Le LTC4359 détecte la chute de tension sur la broche IN-OUT et commande le MOSFET pour qu'il soit dans l'état passant. L'amplificateur interne (GATE AMP) et la pompe de charge font en sorte de maintenir une chute de tension de 30 mV aux bornes du MOSFET. Si le courant de la charge provoque une chute de tension supérieure à 30 mV, le MOSFET est placé dans l'état totalement passant et la chute de tension directe augmente en fonction de la valeur $R_{DS(ON)} \bullet I_{LOAD}$.

Si le courant de la charge diminue, la broche GATE AMP commande la grille du MOSFET à une tension plus basse pour maintenir une chute de tension de 30 mV. Si le courant direct diminue jusqu'au stade où il est impossible de maintenir une tension de 30 mV, la broche GATE AMP bloque le MOSFET. Cette action permet d'éviter l'inversion du courant continu et permet un basculement fluide et sans oscillations dans les applications de connexion des alimentations en parallèle.

En cas de court-circuit en entrée, le courant s'inverse rapidement et est fourni par une capacité de sortie ou une autre alimentation. Le comparateur de rappel rapide (FPD COMP) détecte le courant inverse en mesurant la chute de tension aux bornes du transistor MOSFET entre les broches IN et OUT. Lorsque cette tension est supérieure à − 30 mV aux bornes du MOSFET, le comparateur FPD COMP réagit en rappelant la grille du MOSFET au niveau bas en moins de 500 ns.

La broche SHDN contrôle le circuit intégré et les MOSFET externes. Le rappel de la broche SHDN au niveau bas désactive les circuits intégrés et les MOSFET externes, tout en réduisant le courant à seulement 14 µA. Pour réactiver le circuit intégré, il suffit de laisser la broche /SHDN à l'état flottant ou d'y appliquer un état haut. Dans l'état flottant, une source interne de courant d'une intensité de 2,6 µA rappelle la broche /SHDN à l'état haut.

Plus efficace qu'une diode Schottky

Une solution de diode utilisant un MOSFET réduit la dissipation d'énergie et la chute de tension directe par rapport à une diode Schottky. De plus, il s'agit d'une solution plus polyvalente, puisqu'il existe une large sélection de MOSFET répondant pratiquement à toutes les combinaisons de tensions et de courants. Les figures 2 et 3 comparent la dissipation d'énergie et la chute de tension directe d'une diode Schottky SBG2040CT et d'un transistor MOSFET BSC028N06NS. Pour une intensité de 20 A, le MOSFET BSC028N06NS à 2,8m Ω de résistance ne dissipe que 1 W, ce qui représente une réduction de dissipation de 8 W par rapport à la diode Schottky SBG2040CT. La chute de tension directe considérablement réduite du MOSFET, $R_{DS(ON)} \bullet I_{LOAD}$, d'une valeur de 56 mV, à comparer aux 450 mV de la diode Schottky, permet aux circuits de fonctionner à une tension plus basse.

Diode 12 V/20 A pour l'automobile avec protection contre les inversions des polarités en entrée

La figure 4 représente une application 12 V, 20 A courante qui permet d'assurer une protection contre les inversions de polarité jusqu'à -40 V. La chute de tension directe atteint seulement 56 mV à pleine intensité du courant de charge du fait de la faible résistance passante du MOSFET, d'une valeur de 2,8 mΩ.

En cas de court-circuit en entrée, il peut apparaître des transitoires potentiellement destructeurs sur les broches IN, SOURCE et OUT. Les diodes D1 et D2 protègent les broches IN et SOURCE en fixant les transitoires de tension à moins de − 40 V. Q1, transistor MOSFET BVDSS fonctionnant à 60 V, avec une intensité d'avalanche de 50 A, absorbe l'énergie d'induction et empêche les broches IN, SOURCE et OUT de dépasser leurs valeurs maximales absolues.

Les circuits aval, notamment les convertisseurs CC/CC et les régulateurs linéaires, nécessitent une protection contre les tensions résultant des inversions de polarités et des erreurs de raccordement des bornes d'une batterie. Les broches d'entrée du LTC4359 acceptent une intensité nominale de − 40 V. Pour maintenir le MOSFET bloqué, un comparateur interne NEGATIVE COMP détecte si la broche SOURCE est négative par rapport à la tension V_{SS} avec un écart d'au moins 1,7V, puis applique une tension de rappel basse sur la broche GATE. Le MOSFET étant bloqué, la tension négative ne peut pas atteindre la charge. La protection contre les inversions des polarités est limitée à environ − 40 V par la dissipation dans R1.

Utiliser une diode comme commutateur de charge

Il est possible d'utiliser le circuit intégré LTC4359 comme commutateur pour contrôler l'application d'une alimentation à la charge. Une diode Schottky, ou similaire à celle du circuit représenté sur la figure 4, conduit toujours un courant dans le sens direct. Lors d'un arrêt, le LTC4359 bloque le MOSFET, mais sa diode de substrat continue à conduire dans le sens direct.

Pour bloquer ce courant direct, un MOSFET supplémentaire, Q2, est ajouté, comme le montre la figure 5. La broche /SHDN sert de signal de commande pour activer/désactiver le commutateur de charge. Le rappel vers le bas du signal /SHDN bloque les deux MOSFET : Q2 bloque le courant direct et Q1 empêche le courant inverse. Les diodes de substrat des MOSFET sont orientées dans des directions opposées, ce qui bloque à la fois les courants direct et inverse. L'état flottant ou la commande à l'état haut de la broche /SHDN active le circuit intégré et autorise le fonctionnement des diodes dans les MOSFET. Lors de l'activation, il est possible de limiter le courant d'appel en contrôlant le taux d'oscillation sur la broche GATE avec le condensateur de grille C1 et le courant de grille contrôlé du LTC4359.

Pour la mise en place de plusieurs alimentations, il est possible de dupliquer le schéma de principe de la figure 5 pour sélectionner de manière active les sources d'alimentation, indépendamment de la tension source relative. Cette approche contraste avec un schéma de sélection passive qui utilise le fonctionnement strict d'une diode en se contentant de sélectionner la source d'entrée possédant la valeur de tension la plus haute.

Mise en parallèle des alimentations

Il est possible d'utiliser plusieurs circuits intégrés LTC4359 pour combiner les sorties de deux alimentations redondantes, au plus, ou en répartissant les alimentations sur la charge, comme l'indique la figure 6. Pour les alimentations redondantes, c'est la tension de sortie maximale qui fournit l'essentiel ou la totalité du courant de la charge. Si la sortie de l'alimentation est mise à la masse alors qu'elle génère le courant de la charge, le courant s'inverse temporairement, en circulant en sens inverse dans le MOSFET. Le LTC4359 détecte ce courant inverse, active le comparateur de rappel rapide (FPD COMP) et bloque le MOSFET dans les 500 ns qui suivent.

Si l'autre alimentation, plus basse au départ, ne génère aucun courant pour la charge au moment où se produit le défaut, la tension de sortie chute jusqu'à ce que la diode de substrat de son MOSFET configuré en OU logique conduise. Parallèlement, le LTC4359 charge la grille du MOSFET avec un courant de 10 µA jusqu'à ce que la chute de tension directe soit ramenée à 30 mV. Si cette alimentation produit une partie du courant de charge au moment du défaut, son MOSFET OU logique associé se contente de commander la grille du MOSFET jusqu'à ce que se produise une chute de tension de 30 mV.

Il est possible de réaliser la répartition des alimentations sur la charge si les tensions de sortie et les impédances de sortie des alimentations sont pratiquement égales. La technique de régulation à 30 mV permet une répartition continue de la charge et sans oscillation entre les sorties. Le niveau de partage est fonction de la valeur $R_{DS(ON)}$ du MOSFET, de l'impédance de sortie des alimentations et de leurs tensions de sortie initiales, comme le prévoit la loi d'Ohm.

Extension de la plage de protection contre les inversions de polarités

La figure 7 représente le LTC4359 configuré sous la forme d'une diode 48 V idéale, protégée contre les inversions de tensions en entrée. La résistance R2 a été ajoutée pour élargir la plage V_{IN}–V_{OUT} jusqu'à − 100 V CC avec pour conséquence de diminuer de 10 mV la régulation directe. Dans les applications où la sortie est maintenue à + 48 V par une seconde alimentation ou par des condensateurs chargés, le transistor Q1 va bloquer une tension d'entrée de 48 V inversée. Dans les applications sans redondance des alimentations où il est possible que la sortie descende jusqu'à zéro lorsque l'alimentation d'entrée est déconnectée ou accidentellement inversée, il est possible d'empêcher que les tensions d'entrée atteignant − 100 V CC soient acheminées vers la sortie.

R2 est un composant tolérant aux impulsions, ce qui lui permet d'absorber facilement les transitoires V_{IN}–V_{OUT} supérieurs à − 100 V. Le transistor Q1 a été choisi à la fois pour sa tension BV_{DSS} de 250 V et pour sa résistance $R_{DS(ON)}$ exceptionnellement faible de 20 mΩ, mais le niveau d'avalanche est d'à peine 320 mJ pour un courant maximal d'avalanche de 47 A. Dans le cas où le courant inverse dépasse le niveau de courant d'avalanche du MOSFET, il est possible d'ajouter la diode D6 pour protéger le transistor Q1 en absorbant une éventuelle énergie d'avalanche, ce qui limite la tension V_{IN}–V_{OUT} crête à − 150 V. Au-delà de ce point, la diode D6 atteint sa tension d'amorçage et transmet les impulsions de courant transitoires à la sortie.

Conclusion

Le contrôleur de diode idéale LTC4359 remplace les diodes Schottky et peut également attaquer un commutateur de charge. Pour des courants atteignant 1 à 2 A, voire plus, le LTC4359 est supérieur aux solutions à diodes Schottky. Avec sa plage de tensions de fonctionnement atteignant 4 V à 80 V et ses capacités d'inversion des polarités en entrée, le LTC4359 maintient un faible niveau de chute de tension directe, notamment pour les applications de démarrage à froid dans le secteur de l'automobile, et protège la charge contre le raccordement inversé des bornes d'une batterie. Le mode arrêt abaisse encore le courant de repos de 155 µA jusqu'à 14 µA et peut être utilisé comme signal d'activation et de désactivation pour un commutateur de charge. Le circuit LTC4359 est parfaitement adapté dans les environnements des secteurs de l'automobile et des télécommunications, mais aussi pour les applications utilisant plusieurs alimentations.

Tableau 1. Contrôleurs de diode idéale

REFERENCE	TENSION DE FONCTIONNEMENT	COURANT D'ALIMENTATION SOUS 12 V	$I_{GATE(UP)}$	CARACTERISTIQUES
LTC4357	9 V à -80 V	650 µA	20 µA	Délai de blocage de 0,5 µs avec une intensité de rappel de 2 A sur la grille
LTC4359	4V à -80 V	155 µA	10 µA	Mode arrêt avec faible courant I_0, protection contre les inversions de polarités en entrée jusqu'à – 40 V, commande de transistors MOSFET uniques ou dos-à-dos

Légendes des figures :

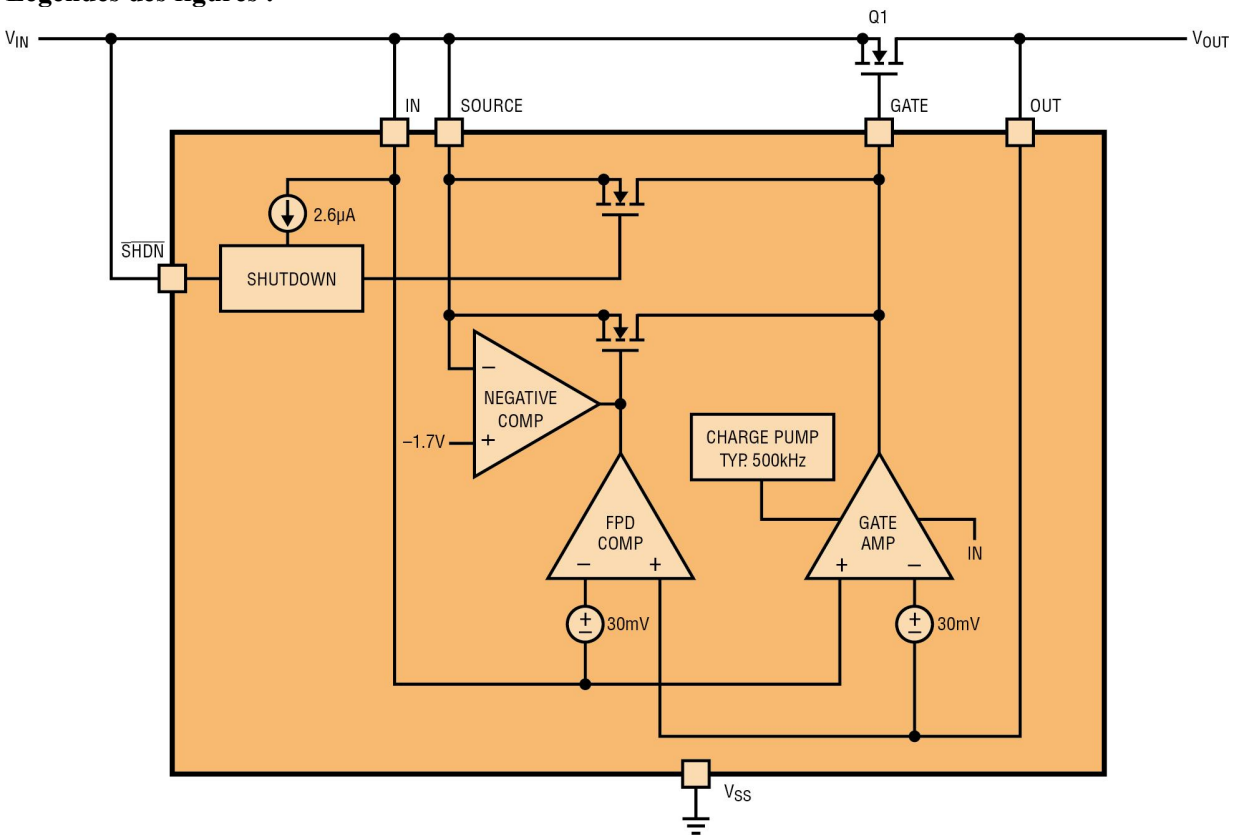


Figure 1. Schéma de principe du circuit LTC4359

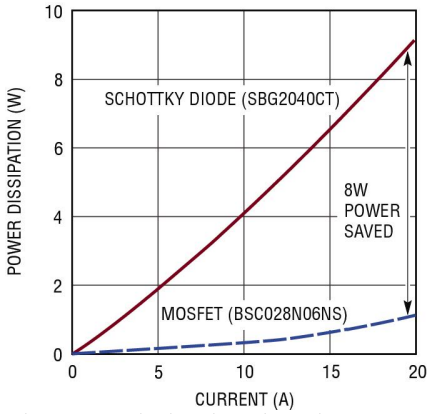


Figure 2. Dissipation de puissance en fonction du courant de charge

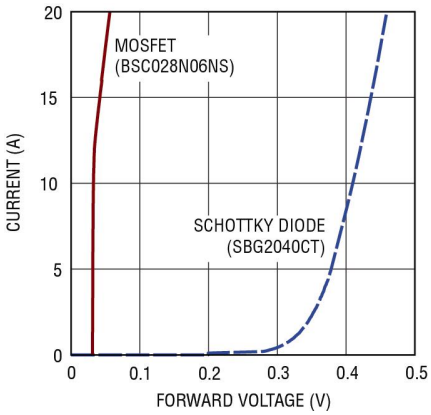


Figure 3. Courant dans la charge en fonction de la chute de tension directe

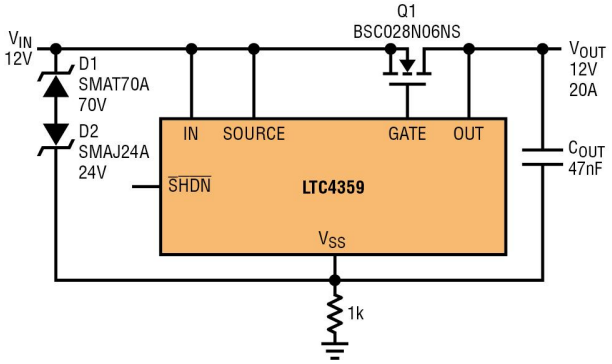


Figure 4. Diode idéale 12 V/20 A avec protection contre les inversions des polarités en entrée

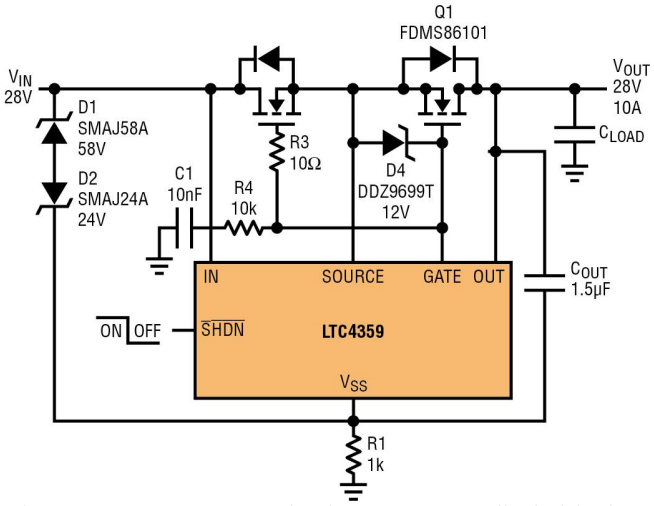


Figure 5. Commutateur de charge 28 V et diode idéale avec protection contre les inversions des polarités en entrée

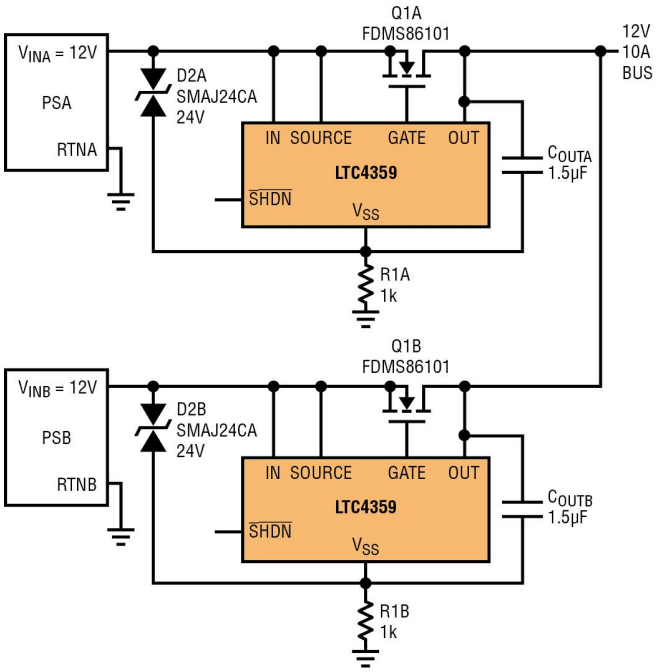


Figure 6. Mise en parallèle des alimentations

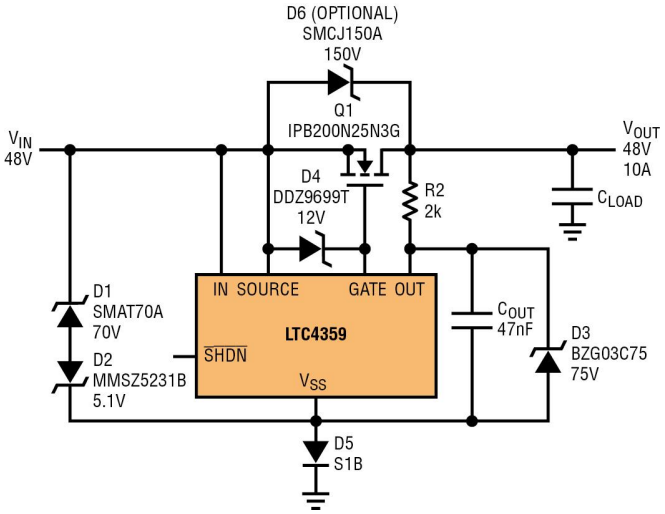


Figure 7. Diode idéale 48 V avec protection contre les inversions des polarités en entrée