Circuits de protection d'inversion de polarité

Matthias Ulmann

La plupart des appareils électroniques disposent d'une protection d'inversion de la polarité pour éviter toute dégradation en cas de branchement inverse de la batterie ou de la prise, en redondance avec un dispositif mécanique. Dans le domaine de l'électronique automobile, une protection d'inversion de polarité est impérative afin d'éviter la dégradation des systèmes électroniques en cas d'inversion accidentelle de la polarité lors de l'installation d'une nouvelle batterie. Dans la mesure où les systèmes automobiles sont désormais largement électroniques, une telle dégradation équivaudrait à la perte complète du véhicule. Diverses approches existent pour réaliser une telle protection, chacune présentant ses avantages et inconvénients propres. Le présent article énumère et décrit plusieurs circuits pouvant être utilisés, non seulement dans l'industrie automobile, mais également pour tout type d'application nécessitant une protection d'inversion de polarité.

Diode

La méthode la plus simple et la moins coûteuse pour réaliser une protection d'inversion de polarité consiste à placer une simple diode entre la source et la charge, comme présenté à la Figure 1. C'est une solution très fiable, mais qui présente un inconvénient majeur, notamment aux intensités élevées. En effet, la chute de tension directe est de l'ordre de quelques centaines de millivolts pour une diode Schottky, ce qui cause des pertes de puissance, et donc un réchauffement de l'appareil. Ainsi, les pertes de puissance limitent l'intensité maximale et déterminent le type de boîtier de la diode. On considère qu'un boîtier SMA, SMB ou SMC convient respectivement pour une puissance maximale de 200 mW, 300 mW ou 500 mW. Pour des pertes plus élevées, un boîtier plus complexe de type SMPC (TO-277A) doit être utilisé.

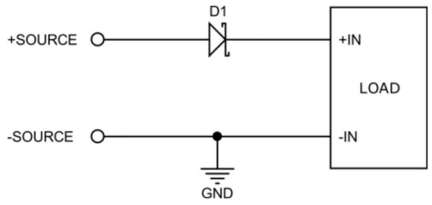


Figure 1 — Diode

La chute de tension directe peut poser d'autres problèmes. La plupart des appareils électroniques automobiles doivent rester fonctionnels même lors du démarrage. Lors du démarrage du moteur, la tension de la batterie chute, en particulier lorsque la batterie est vieille ou par température basse. Selon les spécifications, cette chute de tension peut atteindre 3,2 V. Toute chute de tension supplémentaire, comme celle d'une diode de protection d'inversion de polarité, a une incidence majeure, car elle réduit encore davantage la tension d'entrée des circuits en aval.

PFET

Si les pertes d'une diode s'avèrent trop élevées ou si la chute de tension directe n'est plus acceptable, un PFET peut être utilisé de la manière présentée à la Figure 2. C'est une solution relativement simple qui ne nécessite que quelques composants.

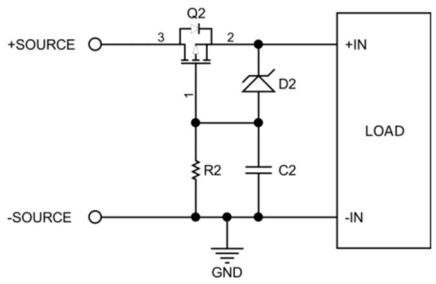


Figure 2 — PFET

Si la tension est appliquée avec la bonne polarité, le substrat du transistor à effet de champ est passant et la tension à la source est égale à la tension d'entrée (moins la chute de tension directe du substrat). La grille est mise à la terre au moyen d'une résistance, généralement de l'ordre de 10 à 100 kΩ). Ainsi, la tension de la grille est plus faible que celle de la source et le transistor à effet de champ est passant. La diode Zener montée entre la source et la grille limite la tension maximale pour éviter d'endommager le transistor à effet de champ. La tension grille-source et la diode Zener doivent être sélectionnées de sorte que le transistor à effet de champ soit pleinement passant, généralement pour une tension de l'ordre de 4,5 à 15 V. Un condensateur monté en parallèle de la résistance réduit le bruit et remplit la fonction de filtre. Selon la résistance du PFET à l'état passant, cette solution convient pour un courant de charge de plusieurs ampères. Son inconvénient consiste en un coût plus élevé et une performance réduite comparés à ceux d'un NFET. Le choix de PFET est en outre beaucoup plus réduit.

NFET

Dans la plupart des cas, il est plus simple de piloter un PFET, car la grille du transistor à effet de champ doit avoir un potentiel inférieur à celui de la source pour le rendre passant, comme nous l'avons vu dans la méthode précédente. Avec un NFET, il s'agit du contraire : pour rendre le transistor passant, le potentiel de la grille doit être supérieur à celui de la source. Monté sur la ligne de masse (GND), comme indiqué à la Figure 3, le NFET peut être piloté de la même manière que le PFET dans la méthode précédente.

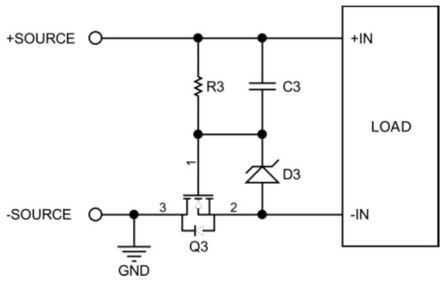


Figure 3 — NFET

La résistance applique à la grille la tension d'entrée, tandis que la source est connectée à l'entrée négative de la tension d'alimentation par le substrat du transistor à effet de champ. Ainsi, la tension de la grille est supérieure à celle de la source et le transistor à effet de champ est passant dès qu'une tension d'entrée est appliquée correctement. Dans ce circuit, une diode Zener est également nécessaire pour caler la tension grille-source du transistor à effet de champ dans une plage acceptable. Cette méthode permet d'utiliser un NFET, qui est moins coûteux qu'un PFET pour une même résistance à l'état passant. Son inconvénient est que la ligne GND est interrompue, ce qui n'est pas autorisé dans les applications automobiles. Il s'agit cependant d'une bonne solution pour les applications ne présentant pas cette exigence.

Contrôleur à diodes intelligent

Aux intensités élevées notamment, la solution avec PFET peut devenir trop coûteuse et encombrante par rapport aux NFET de même boîtier. En outre, les applications automobiles n'autorisent pas de protection sur la ligne de masse (GND). On utilise alors des NFET sur la ligne d'entrée, pilotés par des contrôleurs spécifiques appelés contrôleurs à diodes intelligents. Différents contrôleurs présentant des ensembles de caractéristiques différents existent sur le marché, tels que celui de Texas Instruments convenant aux applications automobiles, le LM74700-Q1 (www.ti.com/product/LM74700-Q1). Tous les contrôleurs possèdent une pompe de charge intégrée qui utilise un condensateur externe (C4) pour délivrer une tension supérieure à la tension d'entrée afin de piloter le transistor à effet de champ. Le schéma de la Figure 4 montre bien qu'il s'agit d'une solution simple et peu encombrante, du fait de l'intégration des différentes fonctions dans le circuit intégré.

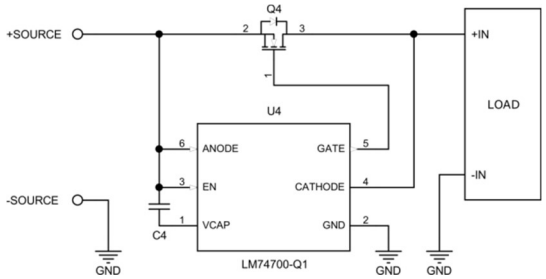


Figure 4 — LM74700-Q1

Lorsque le courant de charge est faible, le contrôleur régule la chute de tension au niveau du transistor à effet de champ à 20 mV. Lorsque la charge est plus élevée, le transistor fonctionne en régime saturé et la chute de tension est proportionnelle au courant de charge et à la résistance à l'état passant. Si une inversion du courant est détectée, le transistor à effet de champ est automatiquement bloqué et le substrat bloque le courant inverse. Toutes les solutions présentées ci-dessus se bloquent même si une tension inverse survient lors du fonctionnement alors que le transistor à effet de champ est passant. L'entrée ENABLE du LM74700 commande les circuits internes et réduit la consommation de 30 µA à 3 µA lorsqu'elle est désactivée. Il convient de noter que le substrat reste passant même lorsque le transistor à effet de champ n'est pas ouvert. Cette solution utilise une diode idéale et son NFET présente une meilleure performance et un coût réduit par rapport à ceux d'un PFET, ce qui justifie le coût du contrôleur à diodes intelligent dans la plupart des cas.

Pompe de charge gratuite

Comme mentionné plus haut, une tension supérieure à la tension d'entrée est nécessaire pour faire piloter un transistor sur la ligne d'entrée. Il est possible de délivrer cette tension au moyen d'une pompe de charge supplémentaire, mais, dans la plupart des systèmes, celle-ci n'est pas nécessaire tant qu'une alimentation à découpage est utilisée. La Figure 5 représente un convertisseur Buck synchrone LMS36355-Q1 (http://www.ti.com/product/lms3635-q1) à tension de sortie fixe de 5,0 V, souvent utilisé dans les systèmes de conversion de tension automobiles. Cet appareil est souvent connecté en permanence à la batterie et fournit certaines charges devant être assurées en continu. En conditions de faible charge, l'appareil fonctionne en mode de modulation de fréquence d'impulsion, ce qui signifie qu'il réduit la fréquence de commutation pour réduire les pertes. La fréquence de commutation croît linéairement avec le courant de charge jusqu'à ce que la fréquence nominale soit atteinte.

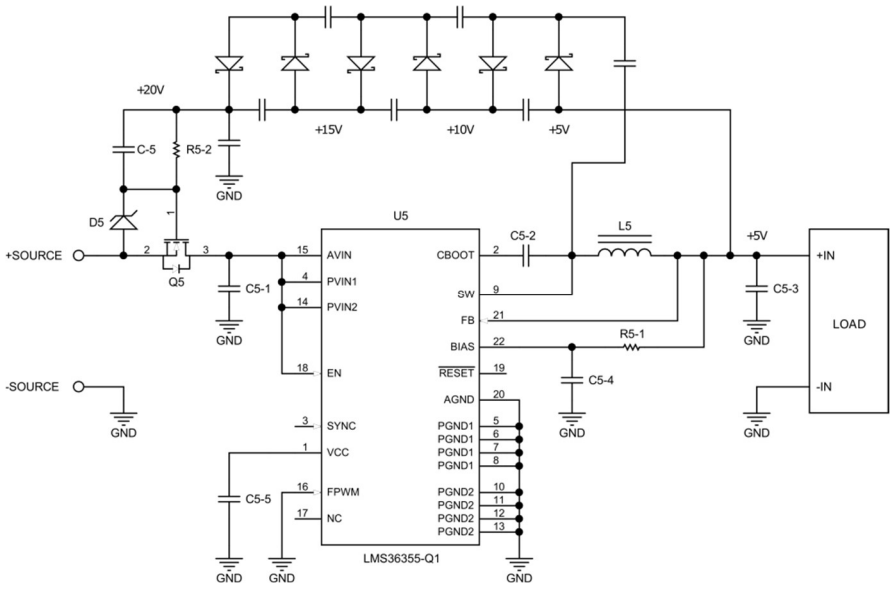


Figure 5 — Pompe de charge

Le nœud de commutation du convertisseur Buck est utilisé pour piloter un circuit doubleur de tension multiétage figurant au-dessus du convertisseur U5. La tension de sortie de +5 V du convertisseur Buck passe à +20 V, ce qui dans cet exemple est supérieur à la tension d'entrée nominale de +12 V. Avec une tension grille-source de +8 V, le transistor à effet de champ fonctionne en régime saturé et les pertes sont négligeables. Le circuit connexe au transistor à effet de champ, avec diode Zener, résistance et condensateur, est identique à celui utilisé dans les autres solutions.
Si le convertisseur fonctionne en mode de modulation de fréquence d'impulsion, ce qui entraîne une fréquence de commutation basse, il se peut que la tension fournie par le doubleur de tension ne suffise plus à piloter le transistor à effet de champ. Comme le courant de charge et le courant d'entrée sont faibles en mode de modulation de fréquence d'impulsion, ce point n'est pas critique. Dans ce cas, le courant traverse le substrat et les pertes sont négligeables. L'avantage de cette solution réside dans l'utilisation d'un NFET peu coûteux, ne nécessitant aucun autre appareil. Dans les configurations où une tension négative peut survenir à l'entrée en fonctionnement normal, cette solution n'est pas appropriée, car un courant inverse peut traverser le transistor à effet de champ qui fonctionne alors encore en régime saturé, ce qui pourrait endommager l'appareil. Pour toutes les applications où une protection d'inversion de polarité ordinaire est nécessaire, cette solution est fiable et constitue un bon choix.

Conclusion

La protection d'inversion de polarité est une composante importante dans la plupart des appareils électroniques et est obligatoire dans certaines applications, telles que les applications automobiles. En fonction des exigences propres au système, différentes solutions sont envisageables. La diode de protection d'inversion de polarité ne convient que pour les intensités ne dépassant pas quelques centaines de milliampères, en raison des chutes de tension directe. Pour les intensités plus élevées, une solution utilisant un PFET ou un NFET est plus avantageuse quant aux pertes. Pour les applications automobiles, un contrôleur à diodes intelligent tel que le LM74700-Q1 de Texas Instruments constitue la solution idéale. Une pompe de charge intégrée pilote un NFET monté sur la ligne d'entrée, plus avantageux qu'un PFET. Lorsqu'une alimentation à découpage est utilisée sur la carte de la protection d'inversion de polarité, une solution utilisant une pompe de charge distincte peut être mise en œuvre comme indiqué dans la dernière méthode.

À propos de l'auteur

Matthias Ulmann est né en 1980 à Ulm, en Allemagne. En 2006, il est diplômé de l'Université d'Ulm en génie électrique. Après avoir travaillé plusieurs années dans le domaine de la commande de moteurs et des onduleurs solaires (spécialisation dans les circuits d'attaque IGBT), il rejoint l'Analog Academy de TI durant un stage d'un an. Depuis 2010, il travaille au sein du groupe de services de conception EMEA en tant qu'ingénieur application systèmes à Freising, en Allemagne. Ses activités de conception concernent notamment les convertisseurs courant continu-courant continu isolés ou non, pour tout type d'application. Il a été élu membre du comité d'experts techniques du Groupe (MGTS) en 2015.