Chéri(e), où est passé mon cordon d'alimentation ?

Thong Huynh, directeur, Application Engineering, Analog Devices

Introduction

À notre époque, la question serait plutôt « *Chéri(e), où est passé mon chargeur de batterie* ? » ! La baisse du coût et l'amélioration des performances des batteries — notamment à base de lithium-ion — enregistrées depuis le début de ce siècle ont favorisé le développement des équipements portables alimentés par batterie, ainsi que des solutions de stockage d'énergie. En outre, les supercondensateurs (également appelés ultra-condensateurs) sont de plus en plus couramment employés dans un large éventail d'applications en raison de leurs caractéristiques hors pair. Certes, on trouve encore de nombreuses batteries au plomb — une technologie âgée de 150 ans —dans les automobiles, les fauteuils roulants, les scooters, les voiturettes de golf et autres systèmes d'alimentation sans interruption (ASI), mais ils doivent être rechargés lorsque l'énergie emmagasinée a été entièrement consommée. Les livraisons mondiales de circuits intégrés de charge ont atteint 1,16 milliard d'unités en 2019 et devraient totaliser 1,72 milliard d'unités en 2024, soit un confortable taux de croissance annuel de 8,6 % pour un chiffre d'affaires de respectivement 518,1 et 735,4 milliards de dollars, soit un TCAC de 7,3 %. La figure 1 illustre cette tendance établie par le « Power IC Market Tracker » d'OMDIA dans son édition 2019[1].

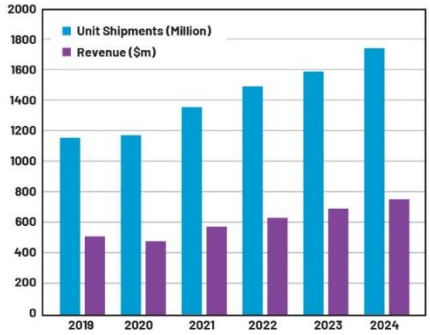

Figure 1. Évolution du marché mondial des circuits intégrés de charge de batterie.

La hausse constante des besoins en énergie, en autonomie ou en durée de fonctionnement impose une augmentation des tensions utilisées dans les solutions de stockage d'énergie. À titre d'exemple, les batteries Li-Ion sont passées d'un ou deux à parfois douze éléments, par exemple dans les robots, les drones ou les outils électriques entre autres. Un pack de batterie Li-Ion à 12 éléments délivre une tension maximale de 50,4 V pour une durée de fonctionnement 12 fois supérieure à une batterie comptant un unique élément pour un courant nominal identique. Il est également possible de connecter 12 batteries en parallèle afin d'obtenir une puissance supérieure, tout en sachant que cette méthode multiplie le niveau de courant par 12. Or, un courant plus élevé augmente les pertes par conduction, de sorte qu'il n'est guère recommandé de monter des batteries en parallèle.

Les systèmes industriels tels que les systèmes d'éclairage d'urgence avec batterie de secours, les alimentations de secours sans interruption (ASI) et autres systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) fonctionnent sous 24 V_{CC}, ce qui signifie qu'une batterie de 24 V est utilisée en appoint de ces systèmes. La source d'alimentation 24 V_{CC} peut toutefois atteindre une tension crête de 60 V en régime transitoire, conformément aux normes CEI 61131-2 et CEI 60664-1.

Dans l'un ou l'autre cas, l'équipement requiert une solution capable de s'adapter à des tensions de batterie plus élevées, ainsi que de résister à une tension d'entrée supérieure en régime transitoire.

Principes de base des chargeurs

Il existe plusieurs topologies de chargeur. Un chargeur linéaire abaisse la différence de tension entre la source d'énergie et la batterie à l'aide d'un commutateur de puissance. Ce type de chargeur présente le niveau d'efficacité le plus bas, dans la mesure où il dissipe beaucoup d'énergie dans le commutateur lorsque la différence de tension entre la source d'énergie et la batterie est conséquente. Le chargeur-élévateur (*boost charger*) élève le niveau de tension de la source d'énergie au niveau de la tension de la batterie. Cette topologie exige que la tension de la source d'alimentation soit inférieure à celle de la batterie. *A contrario*, le chargeur-abaisseur (*buck charger*) réduit la tension appliquée par la source d'alimentation, la tension de la source d'alimentation devant être supérieure à celle de la batterie. Pour sa part, un chargeur-abaisseur-élévateur (*buck-boost charger*) rechargera la batterie en appliquant une tension qui sera supérieure ou inférieure à la tension de la batterie. En revanche, cette topologie nécessite quatre commutateurs de puissance (au lieu de deux pour les chargeurs-abaisseurs) et n'est généralement pas aussi efficace.

Le chargeur-abaisseur à redressement synchrone est le plus efficace, et c'est pourquoi nous lui consacrons cet article. La figure 2 représente un chargeur-abaisseur à redressement synchrone générique. La plupart des chargeurs-abaisseurs actuellement disponibles fonctionnent sous une tension relativement basse : nombre d'entre eux sont conçus pour une tension d'entrée de seulement 28 V, d'autres pour 40 V. En autorisant une régulation de la tension d'entrée de ±10 % et une chute de 2 V aux bornes du chargeur-abaisseur, un chargeur alimenté sous 28 V ne pourra pratiquement charger qu'une batterie Li-Ion 5S (maximum). Nous examinerons une nouvelle famille de circuits de charge qui fonctionnent sous une tension d'entrée de 60 V, autorisent des tensions de charge plus élevées — c'est-à-dire une tension de batterie pouvant atteindre 52 V (ou un pack de 12 éléments Li-Ion) — et supportent des transitoires de 65 V en entrée.

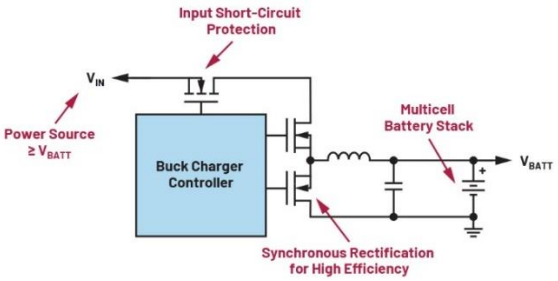

Figure 2. Synoptique d'un chargeur-abaisseur à redressement synchrone générique.

Le courant de veille d'un chargeur doit être peu élevé afin de minimiser la consommation d'énergie. La directive Energy Star® attribue cinq étoiles aux chargeurs de smartphones et autres petits chargeurs qui consomment 30 mW maximum en mode veille, une seule étoile étant attribuée aux chargeurs dont la consommation est supérieure ou égale à 300 mW (d'autres notes sont attribuées aux valeurs intermédiaires). Ce programme a pour objectif de réduire la consommation de courant des chargeurs personnels qui sont généralement branchés en permanence dans une prise murale, même lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Plus d'un milliard de chargeurs de ce type sont connectés en permanence au secteur aux quatre coins du monde.

Les batteries au plomb, au lithium-ion et les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage d'énergie qui présentent des caractéristiques de charge/décharge différentes. Après avoir étudié ces caractéristiques, nous nous intéresserons à une solution de charge pour chacun d'entre eux. Un bon chargeur assure à la batterie des performances et une durabilité optimales, notamment en cas de charge dans des conditions défavorables.

Chargeurs de batteries au plomb

Inventés par le médecin français Gaston Planté en 1859[2], les batteries au plomb-acide constituent la plus ancienne technologie de batterie rechargeable. Un siècle et demi plus tard, ce type de batterie est encore utilisé dans les véhicules automobiles, les fauteuils roulants, les scooters, les bicyclettes électriques, les voiturettes de golf et les systèmes à alimentation sans interruption (ASI).

Les batteries au plomb doivent être chargées lentement, à savoir entre 8 et 16 heures, et stockées en étant chargées, une charge périodique entièrement saturée étant essentielle pour éviter la sulfatation (usure de la batterie). Il est courant de charger des batteries au plomb à 70 % en 8 heures environ, 8 heures supplémentaires étant utilisées pour la très importante charge d'absorption. Une charge partielle ne constitue pas un problème, à condition que la batterie reçoive de temps en temps une charge entièrement saturée afin d'éviter la sulfatation. En outre, laisser la batterie en charge flottante pendant une période prolongée ne provoque pas de dommages.

Il est essentiel de trouver la limite de tension de charge idéale. Une tension élevée (supérieure à 2,45 V/élément) produit de bonnes performances, mais réduit la durée de vie de la batterie en raison de la corrosion de la grille de la plaque positive, tandis qu'une limite de tension basse risque de provoquer la sulfatation de la plaque négative. Par ailleurs, la température affecte la tension des éléments avec un coefficient typique de -5 mV/°C (0,028 V/élément par tranche de 10 °F)[3]. Un bon chargeur doit compenser ce coefficient de température afin d'éviter une surcharge de la batterie aux températures élevées ou une charge insuffisante aux basses températures.

À titre d'exemple, le contrôleur de charge de batterie au plomb MAX17702 (Figure 3) est conçu pour fonctionner dans une plage de tensions d'entrée comprise entre 4,5 et 60 V. Ce circuit constitue une solution « buck » synchrone qui fonctionne en tensions élevées avec un haut rendement (plus de 97 %) et convient idéalement à la charge de packs de batteries au plomb 12 V/24 V/48 V. Les figures 4a et 4b représentent son cycle de charge et l'efficacité de la charge.

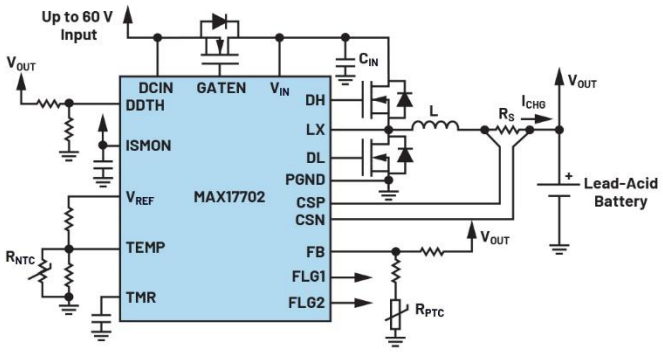

Figure 3. Contrôleur de charge de batterie au plomb en tensions élevées.

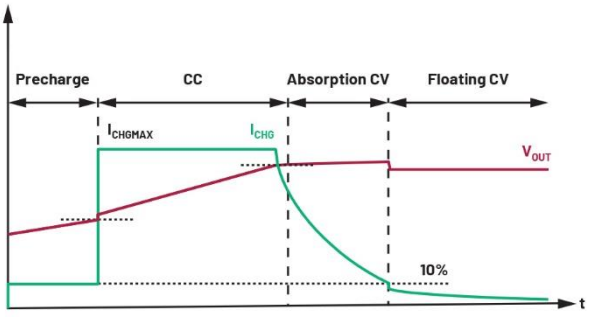

Figure 4a. Cycle de charge du régulateur MAX17702.

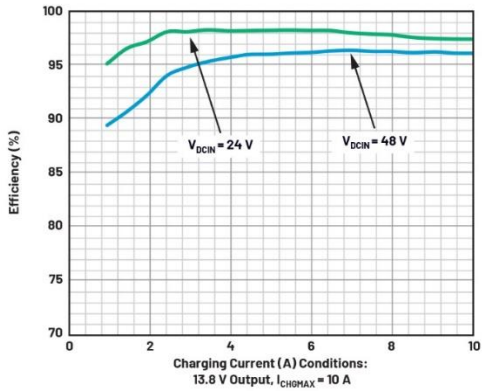

Figure 4b. Efficacité de la charge avec le régulateur MAX17702.

Les batteries au plomb se caractérisent par une faible densité d'énergie, ce qui empêche de les utiliser avec des appareils portables, contrairement aux batteries au lithium.

Chargeur de batteries Li-Ion

La chimie de batterie lithium-ion (Li-Ion) est universellement utilisée dans les applications portables, les industries lourdes, les moteurs à propulsion électrique et les satellites, en raison de sa légèreté et de sa densité d'énergie élevée.

Les batteries Li-Ion nécessitent une maintenance réduite. Elles ne disposent pas de mémoire et n'ont pas besoin d'être entièrement déchargées pour rester en bon état. En revanche, elles doivent être dotées de circuits de protection, à la fois intégrés au pack de batterie et à l'intérieur du chargeur, afin d'éviter les courts-circuits, ainsi que les risques de surcharge, d'emballement thermique et de décharge excessive. Si une batterie Li-Ion est stockée pendant une semaine ou plus avec une charge inférieure à 1,5 V/élément, la formation de dendrites risque de compromettre la sécurité.

Pour éviter toute décharge excessive, le circuit de protection intégré met la batterie en veille. Cette situation se produit lorsque la batterie est stockée dans un état déchargé au cours duquel l'autodécharge amène la tension au point de coupure (*cutoff point*). Un chargeur ordinaire considérera que la batterie est inutilisable et dans la plupart des cas, le pack sera mis au rebut. Un chargeur Li-Ion avancé comporte une fonction de réveil, — de « précharge » — qui permet de recharger une batterie Li-Ion mise en veille à en raison d'une décharge excessive. En mode de précharge, le chargeur applique un faible courant de charge afin de porter la tension en toute sécurité entre 2,2 et 2,9 V/élément et d'activer le circuit de protection ; le processus de charge normal peut alors débuter.

En charge normale, le chargeur Li-Ion fonctionne à courant constant et tension constante (CCCV). Le courant de charge est constant, et la tension plafonnée lorsqu'elle atteint une certaine limite prédéfinie. Lorsque la limite de tension est atteinte, la batterie sature ; le courant chute jusqu'à ce que la batterie ne puisse plus accepter de charge supplémentaire et la charge s'interrompt. Chaque batterie possède son propre seuil de courant faible.

Les batteries Li-Ion doivent rester froides pendant toute la durée de la charge, car cette chimie ne peut absorber une surcharge. Il est par conséquent essentiel de surveiller la température de la batterie et sa tension de charge afin de préserver son bon état et sa sécurité. Un bon chargeur doit afficher ces caractéristiques.

La figure 5 représente un chargeur de batterie Li-Ion avancé. Le régulateur-abaisseur synchrone à haut rendement et tensions élevées MAX17703 est conçu pour fonctionner dans une large plage de tensions d'entrée, à savoir entre 4,5 et 60 V, et charger jusqu'à 12 éléments Li-Ion.

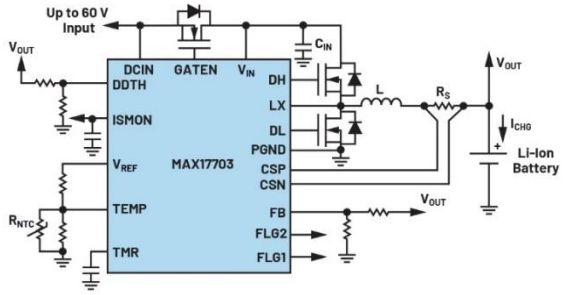

Figure 5. Circuit avancé de charge de batterie Li-ion en tensions élevées.

Le circuit MAX17703 se caractérise par un courant et une tension de charge constants (CCCV) dont le niveau de précision est de respectivement ±4 % et ±1 %. Le chargeur entre dans un état de complément de charge (« top-up ») lorsque le courant de charge atteint le niveau de seuil (« *taper current* »), puis quitte le mode de charge après l'écoulement d'une période de régulation (« *taper timer* »). Le chargeur lance un cycle de recharge lorsque la tension de sortie est inférieure à la tension de seuil de recharge. Cette fonctionnalité est intéressante, car elle permet de maintenir la batterie à un niveau de charge complet même si elle reste sur le socle de charge pendant une période étendue, sans consommer trop d'énergie et conformément aux exigences de la directive Energy Star. Le régulateur peut détecter et préconditionner les batteries fortement déchargées en les réveillant grâce à la fonction de précharge. Pour accroître le niveau de protection, le circuit détecte la température de la batterie et autorise uniquement la charge lorsqu'elle se situe à l'intérieur de la plage de température. Par ailleurs, une fonction de protection empêche la batterie de se décharger en cas de court-circuit accidentel en entrée. La Figure 6 illustre le cycle de charge du MAX17703.

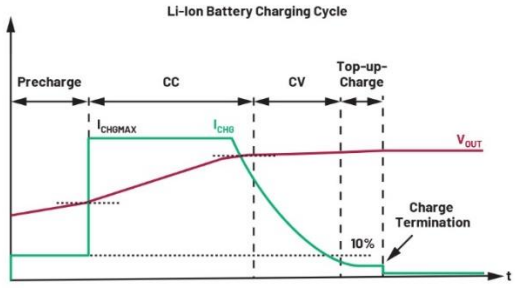

Figure 6. Cycle de charge du chargeur de batterie Li-ion MAX17703

Chargeur de supercondensateurs

Les supercondensateurs sont de plus en plus couramment utilisés dans un large éventail d'applications grâce à des atouts qui les distinguent des batteries. Leur fonctionnement repose sur des principes électrostatiques sans réactions chimiques, évitant ainsi les problèmes de durée de vie inhérents au stockage chimique qui caractérise les batteries. Leur longévité autorise plusieurs millions de cycles de charge/décharge jusqu'à 20 ans, soit nettement plus que les batteries. De plus, leur faible impédance permet une charge et une décharge rapides, de l'ordre de quelques secondes. Ces caractéristiques, associées à leur capacité modérée à maintenir la charge pendant de longues périodes, en font une solution idéale pour les applications nécessitant des cycles de charge et de décharge courts. Les supercondensateurs sont également utilisés en parallèle avec des batteries, par exemple dans des applications où des pointes de puissance instantanées sont nécessaires pendant les transitions de charge.

En raison de la brièveté de leurs cycles de charge et décharge, les chargeurs pour supercondensateurs doivent gérer des intensités élevées et fonctionner sans à-coups en mode

courant constant (CC) pendant une période de charge pouvant commencer à 0 V, ainsi qu'en mode tension constante (CV) lorsque la valeur de sortie finale est atteinte. Dans les applications en tensions élevées, plusieurs supercondensateurs sont connectés en série, ce qui nécessite l'utilisation de chargeurs pour gérer les tensions élevées en entrée et en sortie.

Le contrôleur pour chargeur-abaisseur synchrone à haut rendement et haute tension MAX17701 (voir Figure 7) est conçu pour le mode de charge en courant élevé et fonctionne dans la plage de tensions d'entrée (V_{DCIN}) comprise entre 4,5 et 60 V. La tension de sortie est programmable entre 1,25 V et une valeur V_{DCIN} de -4 V. Ce régulateur utilise un MOSFET à canal N externe pour fournir une fonction OU côté alimentation d'entrée, empêchant la décharge du supercondensateur en retour vers l'entrée. La figure 8 illustre le profil de charge simplifié, mais en courant élevé.

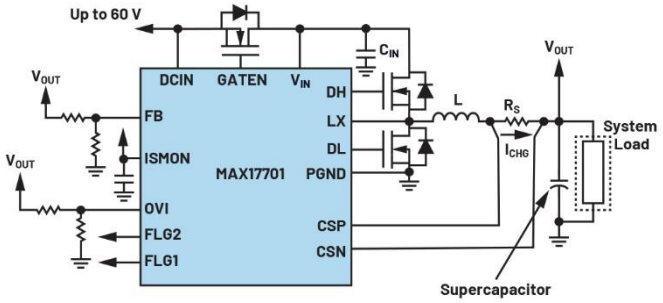

Figure 7. Chargeur de supercondensateur en tension et courant élevés.

Les batteries au plomb, les batteries au lithium-ion et les supercondensateurs sont des solutions de stockage d'énergie qui présentent des caractéristiques de charge/décharge distinctes et nécessitent un chargeur dédié pour optimiser le processus de charge. Par ailleurs, un chargeur de batterie avancé assure une protection appropriée afin de garantir les performances et la longévité de la batterie, notamment lorsque les conditions de charge sont défavorables. Ces exigences sont également prises en compte dans les chargeurs les plus récents.

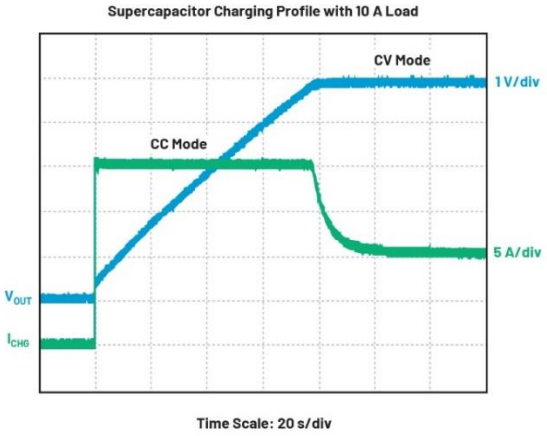

Figure 8. Profil de charge du régulateur pour supercondensateurs MAX17701.

Conclusion

L'utilisation d'appareils portables et de stockage d'énergie alimentés par batterie suit une courbe fortement ascendante. Les besoins croissants de puissance, d'autonomie ou de longévité imposent une hausse des niveaux de tension utilisés dans leurs batteries. Les systèmes industriels alimentés sous 24 Vcc peuvent enregistrer une pointe de tension de 60 V en régime transitoire. Sur la plupart des chargeurs de précédentes générations, la tension d'entrée est limitée à 28 V. Les solutions récemment annoncées par Analog Devices permettent pour leur part d'augmenter la tension des batteries et l'efficacité de la charge grâce à la topologie des chargeurs-abaisseurs synchrones haute

tension.

Références

[1] Kevin Anderson. “Power IC Market Tracker - 2019.” OMDIA, septembre 2020.

[2] “Advancements in Lead Acid.” Battery University, juillet 2016.

[3] US 31DC XC2 - Data Sheet. U.S. Battery, 2019.