Maximiser l’autonomie des ensembles de batteries pour l’automobile en compensant le vieillissement des éléments

Auteurs
Samuel Nork
Directeur, Boston Design Center
et
Tony Armstrong
Directeur marketing produit
Produits Puissance de Linear Technology, division d’Analog Devices

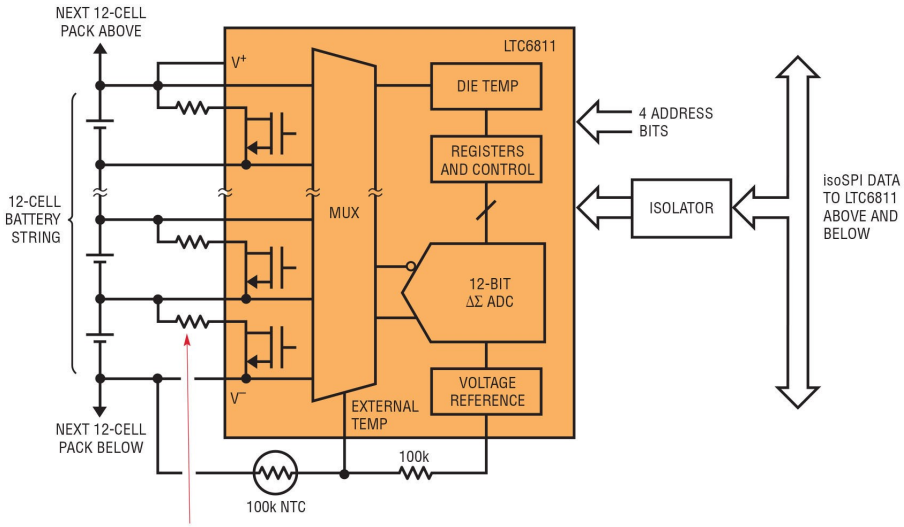
Les grands ensembles de batteries constitués d’éléments Lithium-Polymère ou Lithium Fer Phosphate ($LiFePO_4$) connectés en série, à forte densité énergétique et haute puissance crête sont courants dans les applications de véhicules électriques (avec ou sans batteries) et hybrides gaz/électriques (véhicules électriques hybrides ou hybrides rechargeables), mais aussi dans les systèmes de stockage d’énergie. Pour le seul marché du véhicule électrique, les prévisions font état d'une augmentation considérable de la demande de grands ensembles d’éléments de batteries, connectés en série/en parallèle. Le volume de ventes mondiales de véhicules hybrides rechargeables pour l’année 2016 a atteint 775 000 unités [Source : EVvolumes.com], avec une prévision de 1 130 000 unités pour 2017. Malgré la demande croissante d’éléments à haute capacité, les prix des batteries sont restés plutôt élevés. De plus, elles demeurent le composant le plus coûteux d’un véhicule électrique ou électrique hybride rechargeable, avec des montants souvent situés autour de 10 000 dollars pour une autonomie de conduite de quelques centaines de kilomètres. Ce prix élevé peut être compensé par l’utilisation d’éléments reconditionnés à bas coût. Cependant, ces composants peuvent également présenter des disparités de capacités encore plus importantes, ce qui réduit l’autonomie ou la distance parcourue sur une seule charge. Malgré leur qualité et leur coût élevé, tous les éléments de batteries seront amenés à vieillir par leur utilisation répétée en changeant de caractéristiques les uns par rapport aux autres. Il existe deux méthodes pour augmenter les capacités d’un ensemble d’éléments présentant des disparités : adopter d’entrée des batteries plus massives, ce qui n’est pas très rentable, ou utiliser un équilibrage actif, technique inédite et de plus en plus appréciée qui permet de récupérer la capacité des éléments.

Tous les éléments connectés en série doivent être équilibrés

Les éléments d’un ensemble de batteries sont équilibrés lorsque chacun d’eux possède le même état de charge (SoC). L’état de charge fait référence à la capacité résiduelle présente d’un élément individuel par rapport à sa capacité maximale au fil des charges

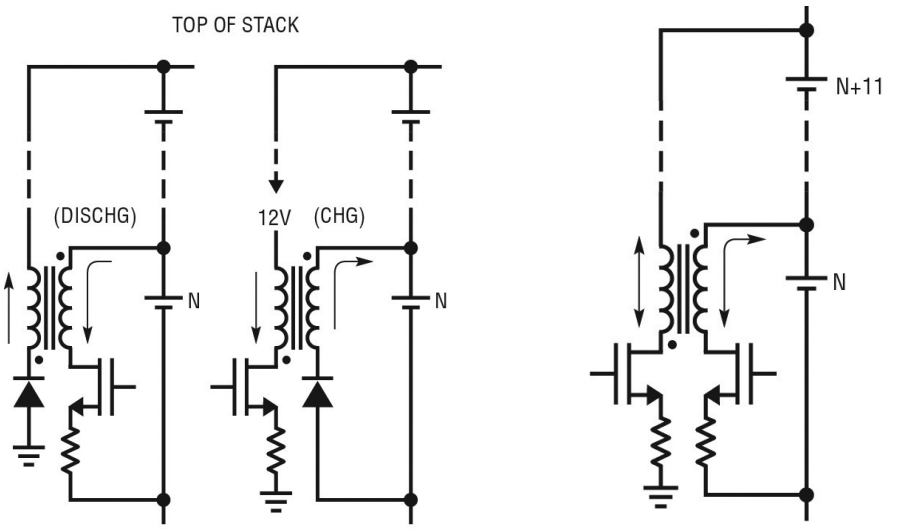
et des décharges. À titre d'exemple, un élément de 10 Ah ayant une capacité résiduelle de 5 Ah possède un SoC de 50 %. Tous les éléments de batterie doivent être maintenus dans cet intervalle d'état de charge pour éviter leur détérioration ou une dégradation de leur autonomie. Les niveaux minimum et maximum autorisés de l'état de charge varient selon les applications. Pour celles où l'autonomie de la batterie est cruciale, tous les éléments peuvent fonctionner entre un état de charge de 20 % minimum et 100 % maximum (qui correspond à la charge complète). De leur côté, les applications pour lesquelles la durée de vie de la batterie est cruciale peuvent imposer un intervalle d'état de charge compris entre 30 % minimum et 70 % maximum. Il s'agit des limites d'état de charge caractéristiques des véhicules électriques et des systèmes de stockage du réseau électrique public qui utilisent des batteries extrêmement volumineuses et coûteuses, et dont le coût de remplacement est très élevé. La fonction principale d'un système de contrôle de batteries d'accumulateurs (BMS) est de surveiller avec soin tous les éléments d'un ensemble et de veiller à ce qu'aucun d'entre eux ne soit chargé ou déchargé au-delà des limites minimale et maximale de l'état de charge pour l'application.

Avec un ensemble d'éléments connectés en série/en parallèle, il est généralement plus sûr de considérer que les éléments connectés en parallèle s'équilibrent mutuellement de manière automatique. L'état de charge s'égalise ainsi automatiquement entre les éléments connectés en parallèle dans la mesure où des circuits de conduction existent entre leurs bornes. Il faut également considérer que l'état de charge des éléments connectés en série va avoir tendance à diverger au fil du temps. L'état de charge peut en effet évoluer graduellement sous l'effet de gradients de température dans l'ensemble du pack de batteries, mais aussi des écarts d'impédances, des taux d'autodécharge des éléments ou de la charge d'un élément dans un autre. Bien que les courants de charge et de décharge des ensembles de batteries tendent à minimiser ces variations d'un élément à un autre, la disparité accumulée ne cessera d'augmenter si les éléments ne sont pas périodiquement équilibrés. La compensation des évolutions graduelles de l'état de charge d'un élément à un autre est la principale raison justifiant l'équilibrage des batteries connectées en série. Généralement, un schéma d'équilibrage passif ou dissipatif convient pour rééquilibrer l'état de charge pour un ensemble d'éléments dont les capacités correspondent.



1A. Passive/Dissipative

Comme l'indique la figure 1a, l'équilibrage passif est simple et peu coûteux. Cependant, il est lent, produit une chaleur indésirable à l'intérieur de l'ensemble de batteries et équilibre la charge en diminuant la capacité résiduelle de l'ensemble des éléments, avec pour référence l'élément possédant l'état de charge le plus faible. En outre, l'équilibrage passif ne peut pas répondre efficacement aux écarts d'état de charge du fait d'une autre caractéristique commune : la disparité des capacités. Tous les éléments perdent leur capacité en vieillissant, et le phénomène se produit à des taux différents pour des raisons déjà citées. Le courant de l'ensemble circulant de manière égale pour tous les éléments connectés en série, la capacité utilisable de l'ensemble est déterminée par l'élément possédant la capacité la plus faible. Seules les méthodes d'équilibrage actif, comme celles illustrées sur les figures 1b et 1c, peuvent assurer une redistribution de la charge pour un ensemble d'éléments et compenser les pertes de capacités liées aux disparités entre éléments.



1B. Active: Unidirectional

1c. Active: Bidirectional

Les disparités entre éléments réduisent considérablement l'autonomie

Les disparités de capacités ou d'état de charge entre éléments provoquent une réduction considérable de la capacité utile d'un ensemble de batteries, sauf s'ils sont équilibrés. Pour maximiser la capacité d'un ensemble, il est nécessaire que les éléments soient équilibrés aussi bien au moment de la charge que de la décharge.

No Active Balancing (30%-70% SoC Limits)

	Initial		Post-Discharge		Post-Fast Charge	
Cell #	Capacity (A-hrs)	SoC (%)	Capacity (A-hrs)	SoC (%)	Capacity (A-hrs)	SoC (%)
1	110	100	47	43	77	*70*
2	100	100	37	37	67	67
3	100	100	37	37	67	67
4	100	100	37	37	67	67
5	100	100	37	37	67	67
6	100	100	37	37	67	67
7	100	100	37	37	67	67
8	100	100	37	37	67	67
9	100	100	37	37	67	67
10	90	100	27	*30*	57	63
	NO BALANCE		NO BALANCE			
Stack Capacity	1000		370		670	

Usable Stack Capacity: 670A-hrs – 370A-hrs = 300A-hrs
(75% of 400A-hrs theoretical max capacity → 100A-hrs "lost")

Dans l'exemple illustré sur la figure 2, un ensemble de dix éléments connectés en série, constitué d'éléments de 100 Ah (nominal) avec un écart de capacité de 10 % entre

l'élément de capacité minimale et maximale, est chargé et déchargé jusqu'à atteindre les limites prédéterminées d'état de charge. Si les niveaux d'état de charge sont maintenus dans un intervalle compris entre 30 % et 70 % et qu'aucun équilibrage n'est effectué, la capacité utile de l'ensemble est réduite de 25 % après un cycle complet de charge et de décharge par rapport à la capacité utile théorique des éléments. L'équilibrage passif pourrait théoriquement permettre d'égaliser l'état de charge de chaque élément pendant la phase de charge, mais ne pourrait pas éviter que l'élément 10 atteigne un niveau d'état de charge de 30 % avant les autres, en cours de décharge. Même en procédant à un équilibrage passif pendant la charge de l'ensemble, une perte de capacité significative apparaît (capacité non utilisable) pendant la décharge. Seule une solution d'équilibrage actif permet de récupérer une certaine capacité en redistribuant la charge entre les éléments à état de charge élevé par rapport à ceux dont l'état de charge est faible, pendant la décharge de l'ensemble.

100% Efficient Balancing (30%-70% SoC Limits)

	Initial		Post-Discharge		Post-Fast Charge	
Cell #	Capacity (A-hrs)	SoC (%)	Capacity (A-hrs)	SoC (%)	Capacity (A-hrs)	SoC (%)
1	110	100	33	*30*	77	*70*
2	100	100	30	*30*	70	*70*
3	100	100	30	*30*	70	*70*
4	100	100	30	*30*	70	*70*
5	100	100	30	*30*	70	*70*
6	100	100	30	*30*	70	*70*
7	100	100	30	*30*	70	*70*
8	100	100	30	*30*	70	*70*
9	100	100	30	*30*	70	*70*
10	90	100	27	*30*	63	*70*
	ACTIVE BALANCE		ACTIVE BALANCE			
Stack Capacity	1000		300		700	

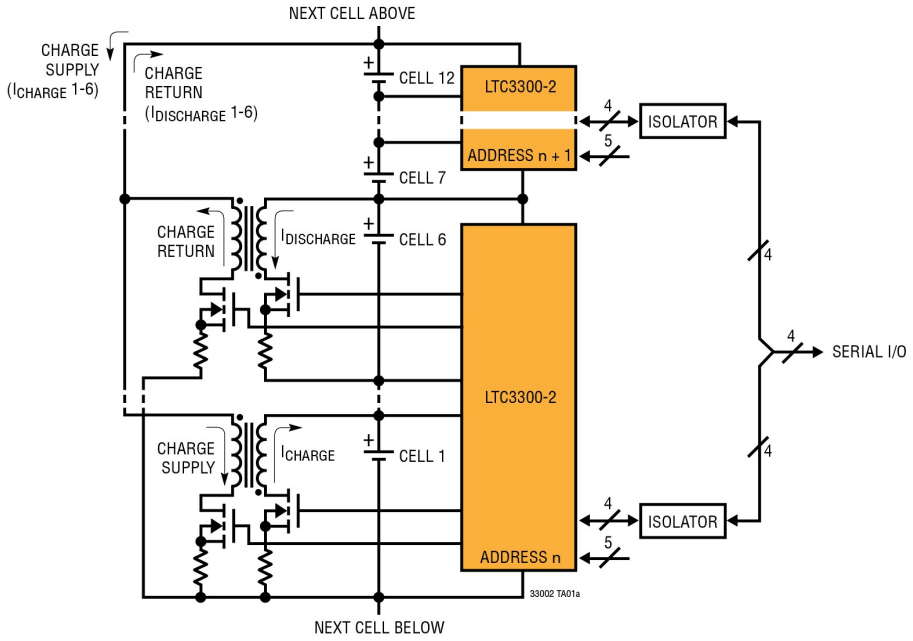
Usable Stack Capacity: 700A-hrs – 300A-hrs = 400A-hrs
(100% of 400A-hrs theoretical max capacity)

La figure 3 montre de quelle manière l'application d'un équilibrage actif idéal permet de récupérer 100 % de la capacité perdue du fait de disparités entre éléments. En régime d'exploitation régulier, lorsque l'ensemble de batteries se décharge par rapport à une recharge « complète » correspondant à 70 % de l'état de charge, la charge stockée doit en réalité être obtenue auprès de l'élément 1 (celui qui possède la capacité maximale) et transférée vers l'élément 10 (celui qui possède la capacité minimale) – faute de quoi, l'élément 10 atteint le point d'état de charge minimal de 30 % avant les autres, et la décharge de l'ensemble doit s'arrêter pour éviter une baisse d'autonomie supplémentaire. De manière similaire, la charge doit être extraite de l'élément 10 et

redistribuée vers l'élément 1 lors de la phase de charge – faute de quoi l'élément 10 atteint le premier sa limite supérieure de 70 % de l'état de charge et le cycle de charge doit être arrêté. À un moment donné au cours de la durée de vie d'un ensemble de batteries, les variations de vieillissement des éléments conduiront inévitablement à une disparité de capacités entre les éléments. Seule une solution d'équilibrage actif permettra de la récupérer en redistribuant la charge, en fonction des besoins, depuis les éléments à haut état de charge vers les plus faibles. Obtenir une capacité maximale d'un ensemble de batteries tout au long de sa durée de vie nécessite une solution d'équilibrage actif pour effectuer une charge et une décharge efficaces de chaque élément et maintenir l'équilibre de l'état de charge pour l'ensemble.

Un équilibrage bidirectionnel extrêmement efficace pour une récupération maximale de la capacité

Le circuit LTC3300-2 (voir figure 4) est un nouveau produit, spécifiquement conçu pour répondre aux besoins d'un équilibrage actif hautement performant. Il permet de contrôler l'équilibrage actif bidirectionnel de manière extrêmement efficace et constitue la pièce maîtresse d'un système de gestion des batteries (BMS) extrêmement performant. Chaque circuit intégré peut simultanément équilibrer jusqu'à six éléments Li-Ion ou $LiFePO_4$ connectés en série.



L'équilibrage de l'état de charge est obtenu en redistribuant la charge entre un élément sélectionné et un sous-ensemble comportant jusqu'à 12 éléments adjacents, ou plus. Les décisions et les algorithmes d'équilibrage doivent être gérés par un appareil de surveillance et un processeur système distincts, chargés de contrôler le LTC3300-2. La

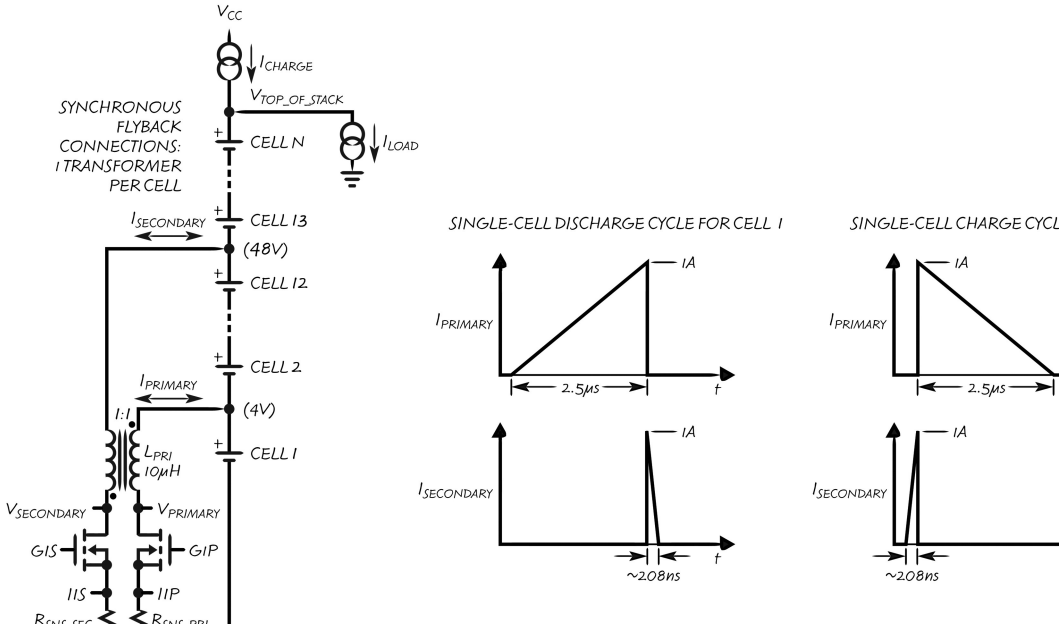
charge est redistribuée entre un élément sélectionné et un groupe de 12 éléments voisins, ou plus, pour décharger cet élément. De manière similaire, la charge est transférée vers un élément choisi dans un groupe de 12 éléments, ou plus. Tous les dispositifs d'équilibrage peuvent fonctionner simultanément, dans une direction ou une autre, pour limiter au minimum le délai d'équilibrage d'un ensemble. Le circuit intégré LTC3300-2 est équipé d'un port série compatible SPI. Les appareils peuvent être connectés en parallèle, en utilisant des circuits d'isolateurs numériques. Les différents périphériques sont identifiés de manière unique par une adresse déterminée par les broches A0 à A4. Sur le circuit intégré LTC3300-2, quatre broches sont consacrées à l'interface série : CSBI, SCKI, SDI et SDO. Les broches SDO et SDI peuvent être reliées ensemble, si nécessaire, pour constituer un port bidirectionnel unique. Cinq broches d'adresse (A0 à A4) permettent de définir l'adresse du composant. Toutes les broches relatives à la communication série sont en mode tension, avec des niveaux ramenés aux valeurs d'alimentation VREG et V–.

Chaque dispositif d'équilibrage du LTC3300-2 utilise un étage de puissance Flyback synchrone en mode limite non isolé pour assurer une charge et une décharge performantes de chaque élément. Chacun des six éléments d'équilibrage doit être équipé de son propre transformateur. Le côté primaire de chaque transformateur est connecté aux bornes de l'élément à équilibrer, et le côté secondaire est connecté sur 12 éléments adjacents ou plus, y compris l'élément à équilibrer. Côté secondaire, le nombre d'éléments n'est limité que par la tension de claquage des composants externes. Les courants de charge et de décharge d'un élément sont programmés par des résistances de détection externes à des valeurs atteignant 10 A et plus, en dimensionnant les commutateurs et les transformateurs externes en conséquence. Le rendement élevé est obtenu par le fonctionnement synchrone et un choix approprié de composants. Les dispositifs d'équilibrage individuels sont activés par le processeur du système BMS et restent actifs jusqu'à ce que le système commande l'arrêt de l'équilibrage ou détecte une condition de défaut.

Le rendement du dispositif d'équilibrage est essentiel !

La chaleur est l'un des adversaires les plus redoutables d'un ensemble de batteries. En effet, les températures ambiantes élevées contribuent à la dégradation rapide de l'autonomie et des performances d'une batterie. Malheureusement, dans les systèmes de batteries produisant des intensités élevées, les courants d'équilibrage doivent également être intenses pour accroître l'autonomie ou pour assurer une charge rapide des éléments. Un mauvais rendement des dispositifs d'équilibrage provoque une chaleur indésirable à l'intérieur du système de batteries, phénomène qui doit être résolu en réduisant le nombre de dispositifs d'équilibrage fonctionnant à un moment donné ou par des méthodes de dissipation thermique coûteuses. Comme l'indique la figure 5, le circuit LTC3300-2 permet d'obtenir un rendement supérieur à 90 % pour la charge et la décharge, ce qui permet d'avoir un courant d'équilibrage plus de deux fois plus

important par rapport à une solution offrant un rendement de 80 %, avec une dissipation d'énergie égale du dispositif d'équilibrage. En outre, un rendement élevé du dispositif d'équilibrage permet une redistribution plus efficace de la charge, ce qui en retour assure une meilleure récupération de capacité et une charge plus rapide.



Conclusion

Dans le cas des nouvelles applications, par exemple les véhicules électriques et hybrides rechargeables, qui sont en pleine expansion, les attentes des consommateurs pour des autonomies importantes et un fonctionnement fiable restent d'actualité. Les possesseurs d'automobiles alimentées par batteries ou carburants souhaitent utiliser leur véhicule pendant plus de cinq ans, sans dégradation perceptible des performances. Dans le cas d'un véhicule électrique ou hybride rechargeable, les performances correspondent à l'autonomie de conduite obtenue par les batteries. Les constructeurs de véhicules électriques et hybrides rechargeables doivent non seulement offrir des batteries extrêmement performantes, mais également une garantie pluriannuelle, avec une autonomie minimale pour rester compétitifs. Alors que le nombre et l'âge des véhicules électriques ne cessent d'augmenter, les disparités de vieillissement des éléments de batteries apparaissent comme un problème chronique et la cause principale de la diminution de l'autonomie. La durée de fonctionnement d'une batterie connectée en série est toujours limitée par l'élément possédant la capacité la plus faible. Un seul élément défectueux peut compromettre l'ensemble. Pour les constructeurs automobiles, le remplacement ou le reconditionnement d'une batterie sous garantie du fait d'une autonomie insuffisante est une offre extrêmement coûteuse.

Pour éviter d'engager de tels coûts, il est possible d'utiliser des batteries plus massives et coûteuses pour tous les éléments, ou d'adopter un dispositif d'équilibrage actif hautement performant, tel que le circuit LTC3300-2, pour compenser les disparités de capacités d'un élément à un autre du fait de leur vieillissement hétérogène. Avec le circuit intégré LTC3300-2, un ensemble d'éléments présentant des disparités importantes bénéficie d'une autonomie quasiment identique à celle d'un ensemble parfaitement corrélé possédant la même capacité moyenne par élément.

Légendes des figures :

Figure 1. Topologies caractéristiques de l'équilibrage des éléments

Figure 2. Exemple de perte de capacité d'un ensemble due à des disparités entre éléments

Figure 3. Récupération de capacité grâce à un équilibrage actif idéal

Figure 4. Dispositif d'équilibrage actif bidirectionnel hautes performances de plusieurs éléments LTC3300-2

Figure 5. Performance d'un étage de puissance LTC3300-2