Pourquoi et comment utiliser les circuits intégrés de gestion de batterie pour les cellules empilées

Rolf Horn, Applications Engineer chez Digi-Key Electronics

Les batteries rechargeables sont de plus en plus utilisées pour fournir des tensions plus élevées et plus de puissance dans des applications telles que les véhicules électriques (VE) et les véhicules électriques hybrides (VEH), les outils électriques, les équipements pour l'entretien des pelouses et les alimentations secourues. S'il est bien connu que les solutions chimiques de toutes sortes doivent faire l'objet d'une surveillance et d'une gestion minutieuses pour garantir un fonctionnement efficace, fiable et sûr, les piles connectées en série de plusieurs dizaines d'éléments (cellules) ou plus qui sont nécessaires pour répondre aux demandes de puissance de ces appareils requièrent une attention accrue de la part des concepteurs, en particulier lorsque le nombre d'éléments par batterie augmente.

La surveillance et la mesure d'une seule cellule ou d'un petit bloc-batteries ne comportant que quelques cellules constituent un défi modeste et sont beaucoup plus simples à réaliser que pour les cellules d'une chaîne en série composée de nombreuses cellules. Les concepteurs d'implémentations multi-cellules empilées doivent prendre en compte des problèmes tels que la réalisation de mesures en dépit d'une tension de mode commun élevée, la présence de tensions dangereuses, les conséquences de la défaillance d'une seule cellule, le multiplexage entre un grand nombre de cellules, le décalage et l'équilibrage des cellules et les différences de température entre les piles, pour n'en citer que quelques-uns. Ils ont besoin de circuits intégrés de gestion de batterie (BMIC) et de systèmes de gestion de batterie (BMS) avancés pour effectuer des mesures et des contrôles paramétriques, ainsi qu'un certain savoir-faire technique pour les utiliser correctement.

Cet article aborde les principes de base et les défis de la gestion des batteries en général, et des batteries multi-cellules en particulier. Il présente, puis montre comment appliquer les systèmes BMIC d'Analog Devices, de Renesas Electronics Corp. et de Texas Instruments qui sont spécifiquement conçus pour répondre aux problèmes uniques de gestion des chaînes de cellules connectées en série.

Les chaînes de batteries en série présentent des défis uniques

La surveillance classique d'une batterie implique la mesure du flux de courant entrant et sortant de la batterie (jaugeage du carburant), la surveillance de la tension aux bornes, l'évaluation de la capacité de la batterie, la surveillance de la température des cellules et la gestion des cycles de charge/décharge pour optimiser le stockage de l'énergie et maximiser le nombre de ces cycles pendant la durée de vie de la batterie. Les systèmes BMIC ou BMS les plus courants assurent ces fonctions pour les petits blocs-batteries composés d'une ou deux cellules seulement, avec des tensions à un chiffre. Le système BMIC ou BMS agit comme un circuit d'entrée d'acquisition de données, ces dernières étant transmises à un contrôleur de gestion des cellules (CMC) ; dans les systèmes plus complexes, le CMC se connecte à une fonction de niveau supérieur appelée contrôleur de gestion de batterie (BMC).

Pour les besoins de cet article, nous désignerons par le terme « cellule » une unité individuelle de stockage de l'énergie, le terme « batterie » correspondant, lui, à l'ensemble du bloc d'alimentation, comprenant plusieurs cellules en série/parallèle. Alors qu'une cellule individuelle

ne produit que quelques volts, un bloc-batteries peut être constitué de dizaines de cellules ou plus et fournir plusieurs dizaines de volts, les combinaisons de blocs-batteries atteignant des niveaux encore beaucoup plus élevés.

Pour une gestion efficace, les paramètres critiques des cellules à mesurer sont la tension aux bornes, le courant de charge/décharge et la température. Les performances de mesure requises pour les blocs-batteries modernes sont relativement élevées : chaque cellule doit être mesurée à quelques millivolts (mV) et milliampères (mA) près, et à environ un degré centigrade (°C) près. Les raisons d'une telle surveillance étroite des cellules sont les suivantes :

- Détermination de l'état de charge (SOC) et de l'état de santé (SOH) du bloc-batteries afin de fournir des prévisions précises sur la capacité restante de la batterie (durée de fonctionnement) et sur sa durée de vie globale.
- Mise à disposition des données nécessaires à la mise en œuvre de l'équilibrage des cellules, qui égalise la tension des cellules chargées les unes par rapport aux autres, malgré leurs différences internes, ainsi que les différents emplacements, températures et stades de vieillissement. Si l'équilibrage des cellules n'est pas effectué, cela entraînera une diminution des performances de la batterie dans le meilleur des cas, voire une défaillance des cellules dans le pire des cas. L'équilibrage peut être réalisé à l'aide de techniques passives ou actives ; ces dernières donnent des résultats un peu meilleurs mais sont plus coûteuses et plus complexes.
- Prévention des nombreuses conditions susceptibles d'endommager la batterie et d'entraîner des problèmes de sécurité pour l'utilisateur (un véhicule et ses occupants, par exemple). Il s'agit notamment de situations non souhaitées, comme suit :
    - Surtension ou charge à des courants excessifs, qui peuvent conduire à un emballement thermique.
    - Sous-tension : une seule décharge excessive ne provoque pas de défaillance catastrophique, mais elle peut entraîner la dissolution du conducteur anodique. Des cycles de décharge excessive répétés peuvent entraîner un placage de lithium dans la cellule de recharge et, là encore, un potentiel emballement thermique.
    - La surchauffe affecte le matériau de l'électrolyte de la cellule, réduisant l'état de charge ; cela peut également augmenter la formation d'une interphase solide-électrolyte (SEI), entraînant une résistivité accrue et non uniforme, ainsi qu'une perte de puissance.
    - Une température trop basse pose également problème car elle peut provoquer un dépôt de lithium, ce qui entraîne également une perte de capacité.
    - Surintensité, et échauffement interne qui en résulte en raison d'une impédance interne inégale et d'un éventuel emballement thermique ; cela peut augmenter les couches de SEI dans la batterie et accroître la résistivité.

Il s'agit là d'un véritable casse-tête car, par exemple, il est assez simple de mesurer avec précision la tension d'une cellule individuelle sur un banc d'essai ou dans un autre cadre sans risque. Il suffit au concepteur de connecter un voltmètre numérique (DVM) flottant (non mis à la terre) ou alimenté par une batterie à la cellule concernée (Figure 1).

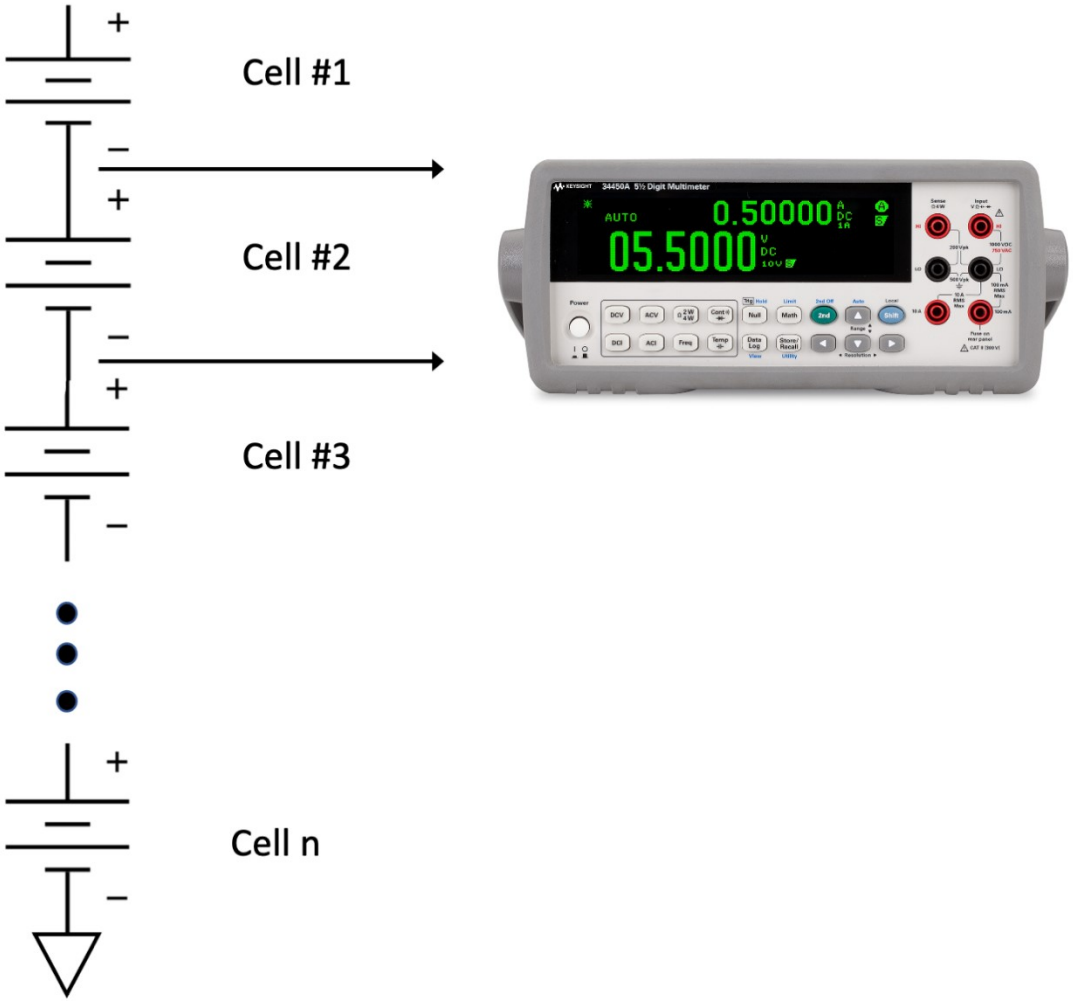

Figure 1 : La mesure de la tension aux bornes de n'importe quelle cellule d'une chaîne en série est un concept simple qui ne nécessite qu'un voltmètre numérique flottant. (Source de l'image : Bill Schweber)

Cependant, pour de nombreuses raisons, il est beaucoup plus compliqué de le faire en toute confiance et sécurité dans une situation difficile sur le plan électrique et environnemental, comme dans un véhicule électrique ou un véhicule électrique hybride. C'est ce qui ressort d'un exemple représentatif de bloc d'alimentation d'un véhicule électrique comprenant 6720 cellules Li+, gérées par huit modules de commande (Figure 2).

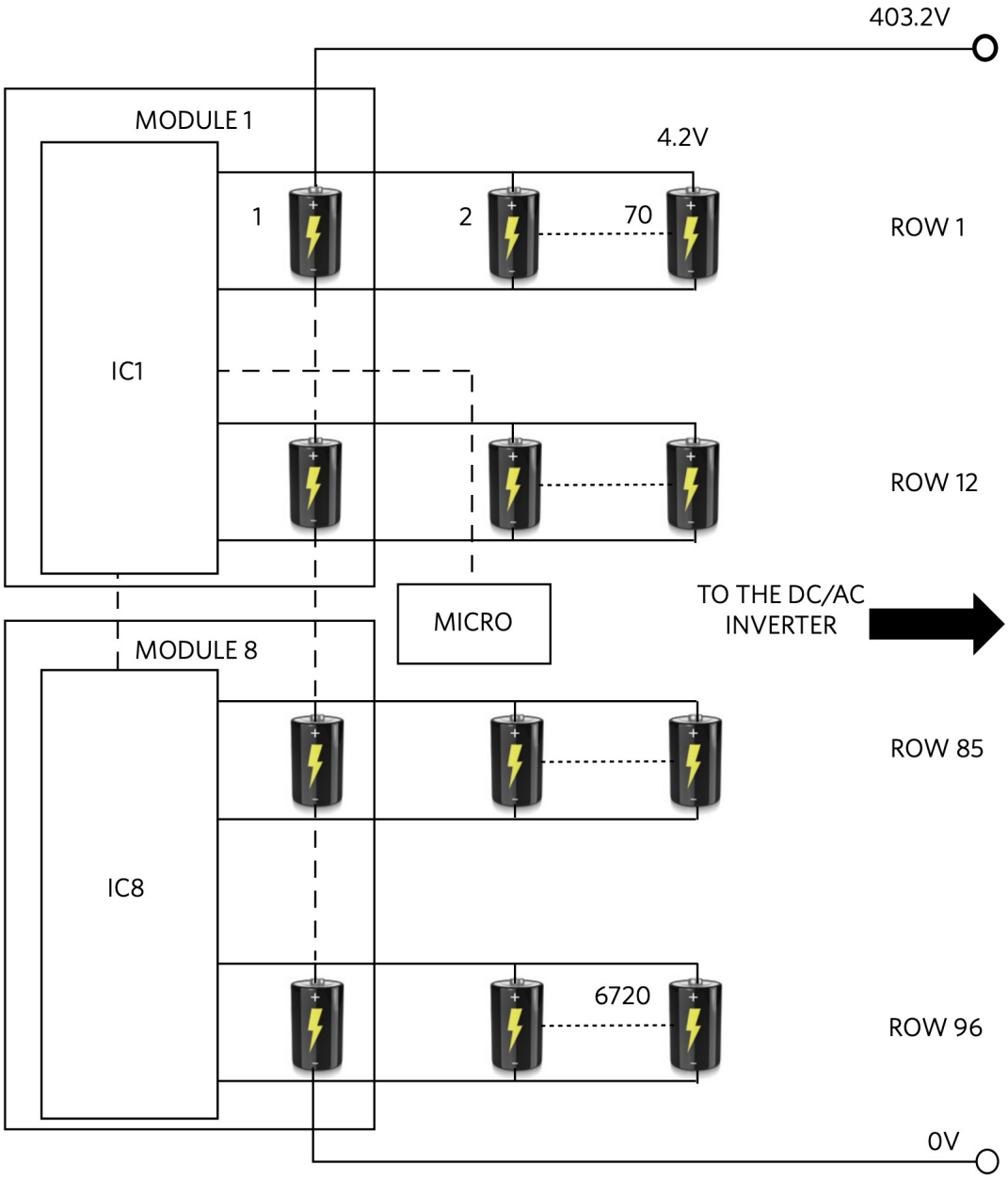

Figure 2 : Un bloc-batteries du monde réel correspond à un ensemble de cellules connectées en série et en parallèle dans des modules, avec une quantité importante d'énergie stockée ; ce sont des facteurs qui compliquent grandement la tâche de mesure de la tension des cellules. (Source de l'image : Analog Devices)

Chaque cellule présente une capacité de 3,54 ampères-heures (Ah), ce qui donne un stockage d'énergie nominal total de 100 kilowattheures (kWh) (3,54 Ah x 4,2 volts x 6720 cellules). Chacune des 96 rangées connectées en série est composée de 70 cellules en parallèle, pour une tension de batterie de 403,2 volts (96 rangées × 4,2 volts), avec une capacité de 248 Ah (100 kWh/403,2 volts ou 3,54 Ah × 70 colonnes).

Parmi les questions abordées, citons notamment :

- Il est difficile de fournir la résolution et la précision nécessaires lors de la mesure d'une faible tension à un chiffre pour obtenir une précision significative à plusieurs millivolts, en raison de la présence d'une tension de mode commun (CMV) élevée, qui peut surcharger le système de mesure ou affecter la validité de la lecture. Cette tension CMV correspond

à la somme des tensions de toutes les cellules connectées en série jusqu'à celle qui est mesurée, par rapport à la masse commune du système (bien que le terme « masse » soit impropre dans ce cas). Notez que dans un véhicule électrique, il peut y avoir jusqu'à 96, voire 128 cellules de batterie en série, ce qui donne une tension CMV de plusieurs centaines de volts.

- En raison de la tension CMV élevée, il est nécessaire d'isoler galvaniquement les cellules du reste du système, à la fois pour l'intégrité électrique et pour la sécurité de l'utilisateur/du système, car aucun des deux ne doit être potentiellement exposé à l'intégralité de la tension de mode commun.
- Les surtensions et le bruit électrique peuvent facilement altérer la lecture dans la plage des millivolts.
- Les nombreuses cellules doivent être mesurées presque simultanément en quelques millisecondes afin de créer une image globale précise des cellules et de l'état du bloc-batteries. Dans le cas contraire, le décalage temporel entre les mesures des cellules peut donner lieu à des conclusions et à des actions trompeuses.
- Le grand nombre de cellules signifie qu'une sorte de dispositif de multiplexage est nécessaire entre les cellules et le reste du sous-système d'acquisition de données, faute de quoi la taille, le poids et le coût du câblage d'interconnexion deviennent problématiques.

Enfin, il existe des facteurs importants et obligatoires liés à la sécurité, à la redondance et au signalement des erreurs qui doivent impérativement être pris en compte. Les normes diffèrent d'un secteur à l'autre ; les outils industriels et électriques ne ressemblent en rien aux automobiles, et les normes applicables à ces dernières sont les plus strictes. Dans les systèmes automobiles critiques, tels que ceux liés à la gestion de la batterie, une perte de fonctionnalité ne doit pas entraîner de situation dangereuse. En cas de dysfonctionnement du système, l'électronique doit être désactivée dans un état « sûr » et le conducteur du véhicule doit être alerté par un voyant du tableau de bord ou tout autre indicateur.

Cependant, pour certains systèmes, un dysfonctionnement ou la perte d'une fonctionnalité peut potentiellement conduire à un événement dangereux et ne peut pas être simplement désactivé, de sorte que les objectifs de sécurité peuvent inclure une exigence déterminée de « disponibilité liée à la sécurité ». Dans ce cas, il peut être nécessaire de tolérer certains types de défauts dans le système pour éviter des événements dangereux.

Une telle disponibilité liée à la sécurité exige la mise à disposition d'une fonctionnalité de base ou d'un chemin de « sortie » déterminé pour une période spécifiée, malgré les conditions de défaut définies. Le système de sécurité doit ainsi tolérer une anomalie pendant cette même période. Cette tolérance aux défauts permet au système de continuer à fonctionner plus longtemps, avec un niveau de sécurité acceptable. Les principales sections de la norme ISO 26262, « Sécurité fonctionnelle des véhicules routiers », fournissent des conseils aux développeurs de systèmes concernant les exigences de disponibilité liées à la sécurité.

Les circuits intégrés apportent des solutions

Les fournisseurs ont mis au point des circuits intégrés BMS conçus pour résoudre le problème de la lecture précise d'une seule cellule dans une chaîne en série, en dépit d'une tension CMV élevée et d'un environnement électrique difficile. Ces circuits intégrés ne se contentent pas de fournir les relevés de base, mais traitent également les problèmes techniques de multiplexage, d'isolement et de décalage temporel. Ils répondent aux normes de sécurité en vigueur et, le cas

échéant, sont homologués ASIL-D pour les applications automobiles, soit le niveau le plus élevé et le plus strict.

Le niveau d'intégrité de sécurité automobile (ASIL) est un système de classification des risques défini par la norme ISO 26262 - Sécurité fonctionnelle des véhicules routiers. Il s'agit d'une adaptation du niveau d'intégrité de sécurité (SIL) utilisé dans la norme CEI 61508 pour l'industrie automobile.

Bien que les fonctions « générales » de ces dispositifs BMS soient similaires, ils diffèrent dans une certaine mesure par leur architecture, le nombre de cellules qu'ils peuvent traiter, la vitesse d'analyse, la résolution, les fonctionnalités uniques et l'approche d'interconnexion :

• L'*architecture CAN isolée* est basée sur une configuration en étoile robuste, car une rupture du fil de communication dans l'architecture CAN isolée ne perturbe qu'un seul circuit intégré, le reste du bloc-batteries restant sûr. Cependant, l'architecture CAN nécessite un microprocesseur et un CAN pour chaque circuit intégré, ce qui rend cette approche plus coûteuse, tout en offrant des vitesses de communication relativement lentes.

• L'*architecture en chaîne* est généralement plus rentable, car sa chaîne basée sur un récepteur/émetteur universel asynchrone (UART) permet une communication fiable et rapide sans la complexité d'un CAN. Elle utilise le plus souvent un isolement capacitif, mais peut également prendre en charge un isolement par transformateur. Cependant, la rupture d'un fil dans l'architecture en chaîne peut perturber la communication. C'est pourquoi certains de ces systèmes en chaîne proposent des « solutions de contournement » et permettent un certain niveau de fonctionnement pendant la rupture du fil.

Parmi les circuits intégrés BMS représentatifs, citons :

• *BMS MAX17843 d'Analog Devices :* le MAX17843 est une interface d'acquisition de données programmable à 12 canaux, pour la surveillance de la batterie, avec des fonctionnalités de sécurité étendues (Figure 3). Il est optimisé pour une utilisation avec des batteries pour les systèmes automobiles, les blocs-batteries des véhicules électriques hybrides, les véhicules électriques et tout système qui empile de longues chaînes en série de batteries métalliques secondaires jusqu'à 48 volts.

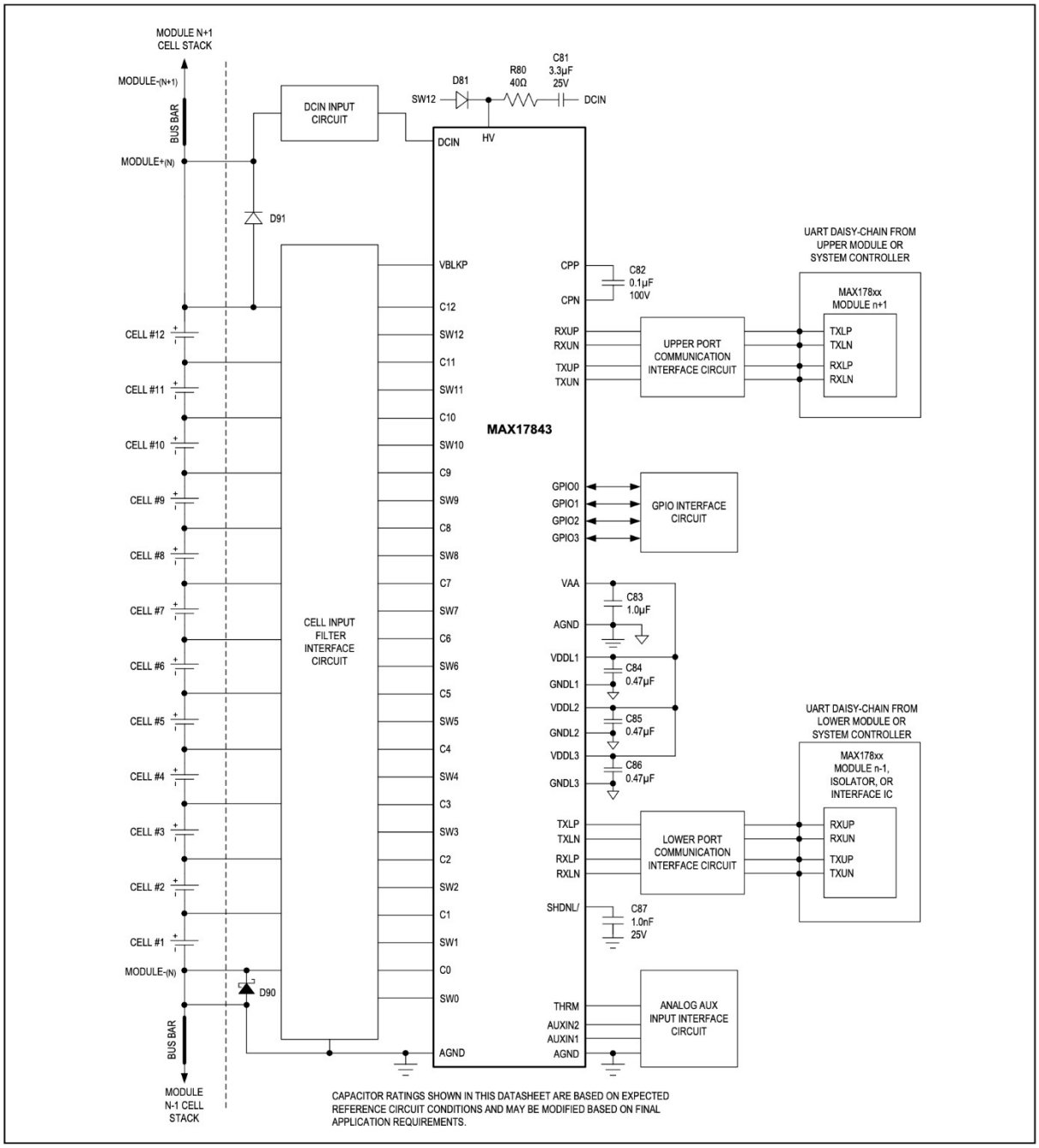

Figure 3 : L'interface d'acquisition de données à 12 canaux MAX17843 pour la surveillance de la batterie intègre de multiples fonctionnalités de sécurité, ce qui la rend adaptée aux exigences et aux applications automobiles. (Source de l'image : Analog Devices)

Le MAX17843 intègre un bus UART différentiel à haute vitesse pour une communication série robuste en chaîne, prenant en charge jusqu'à 32 circuits intégrés connectés dans une seule chaîne (Figure 4). L'UART utilise un isolement capacitif qui non seulement réduit le coût de la nomenclature, mais améliore également l'intensité de défaillance (FIT).

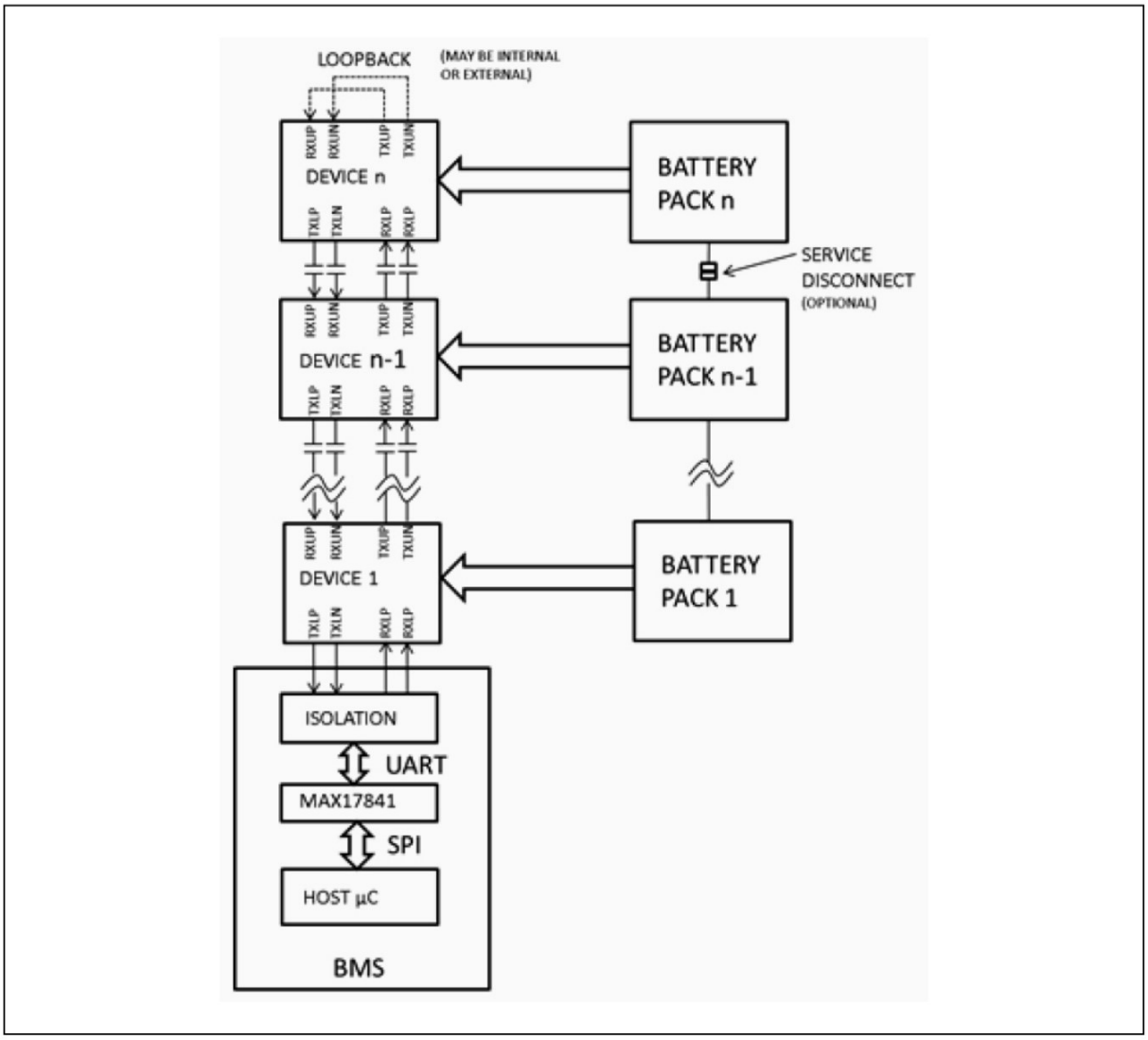

Figure 4 : Le MAX17843 à 12 canaux utilise une isolation galvanique capacitive dans sa configuration UART en chaîne, prenant en charge jusqu'à 32 dispositifs dans une seule chaîne. (Source de l'image : Analog Devices)

Le circuit d'entrée analogique combine un système d'acquisition des données de mesure de tension à 12 canaux avec une entrée de rangée de commutation haute tension. Toutes les mesures sont effectuées de manière différentielle dans chaque cellule. La plage de mesure pleine échelle est comprise entre 0 et 5,0 volts, avec une plage utilisable de 0,2 à 4,8 volts. Un convertisseur analogique-numérique (CAN) à approximations successives (SAR) haute vitesse est utilisé pour numériser les tensions des cellules à une résolution de 14 bits avec suréchantillonnage. Les douze cellules peuvent être mesurées en moins de 142 microsecondes (µs).

Le MAX17843 utilise une approche à deux balayages pour collecter les mesures des cellules et corriger les erreurs, ce qui donne une excellente précision sur la plage de températures de fonctionnement. La précision de la mesure différentielle des cellules est spécifiée à ±2 millivolts (mV) à +25°C et 3,6 volts. Pour faciliter la conception avec ce circuit intégré, Analog Devices propose le kit d'évaluation MAX17843EVKIT# avec une interface utilisateur graphique (GUI) basée sur PC pour l'installation, la configuration et l'évaluation.

• *ISL78714ANZ-T de Renesas :* le circuit intégré BMS Li-ion ISL78714 supervise jusqu'à 14 cellules connectées en série et fournit une surveillance précise de la tension et de la température des cellules, un équilibrage des cellules et des diagnostics complets du système. Dans une configuration type, un ISL78714 maître communique avec un microcontrôleur hôte par le biais d'un port SPI (interface périphérique série), et jusqu'à 29 dispositifs ISL78714 supplémentaires reliés entre eux par une chaîne robuste et propriétaire à deux fils (Figure 5). Ce système de communication est extrêmement souple et peut utiliser l'isolement par condensateur, l'isolement par transformateur ou une combinaison des deux, à une vitesse pouvant atteindre 1 mégabit par seconde (Mbps).

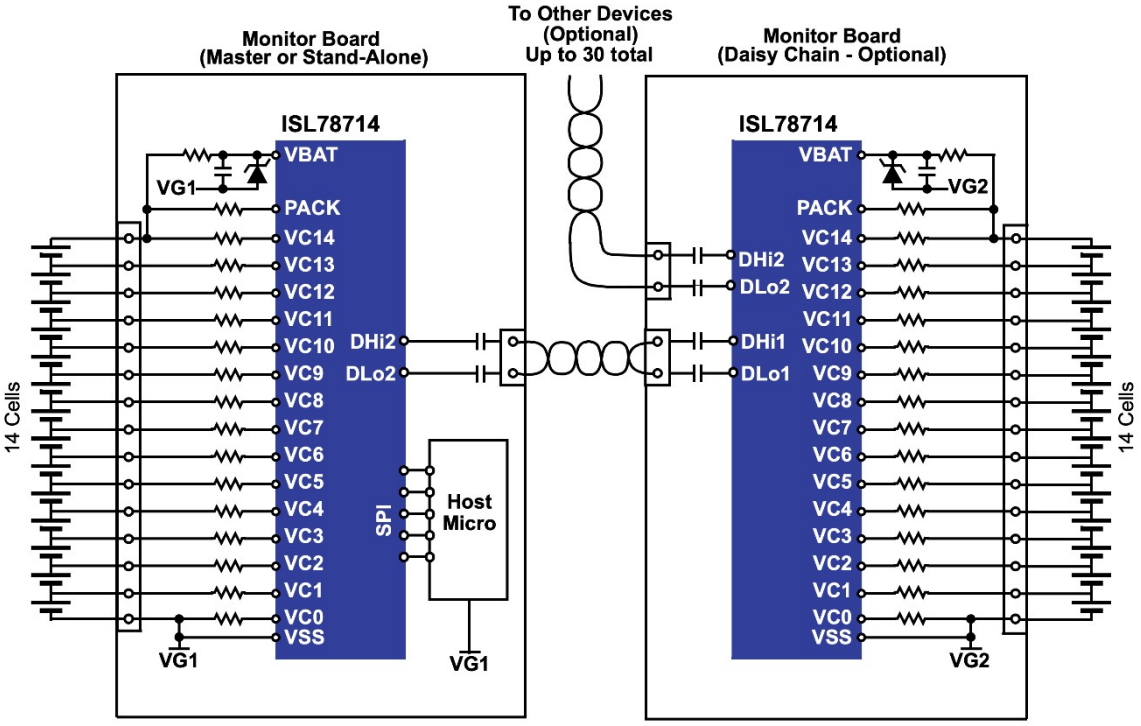

Figure 5 : L'ISL78714 utilise un port SPI pour relier plusieurs dispositifs dans une chaîne à deux fils qui peut faire appel à un isolement capacitif ou par transformateur. (Source de l'image : Renesas Electronics Corp.)

La précision de la mesure de la tension initiale est de ±2 mV avec une résolution de 14 bits sur une plage de 1,65 à 4,28 volts, de 20°C à +85°C ; la précision du dispositif après assemblage sur la carte est de ±2,5 mV sur une plage d'entrée de cellule de ±5,0 volts (la plage de tension négative est souvent nécessaire pour les barres de bus).

Ce système BMS comprend trois modes d'équilibrage des cellules : mode d'équilibrage manuel, mode d'équilibrage temporisé et mode d'équilibrage automatique. Le mode d'équilibrage automatique termine l'équilibrage après qu'une quantité de charge spécifiée par l'hôte a été retirée de chaque cellule. Parmi les diagnostics de système intégrés pour toutes les fonctions clés, on trouve un dispositif d'arrêt de l'horloge de surveillance en cas de perte de communication.

• *BQ76PL455APFCR (et BQ79616PAPRQ1) de Texas Instruments :* le bq76PL455A est un dispositif intégré de surveillance et de protection des batteries à 16 cellules, conçu pour les applications industrielles haute fiabilité et haute tension. L'interface intégrée à haute vitesse, différentielle et isolée par condensateur prend en charge jusqu'à seize dispositifs bq76PL455A,

communiquant avec un hôte par le biais d'une seule interface UART haute vitesse via une chaîne avec un câblage à paires torsadées, à une vitesse pouvant atteindre 1 Mbps (Figure 6).

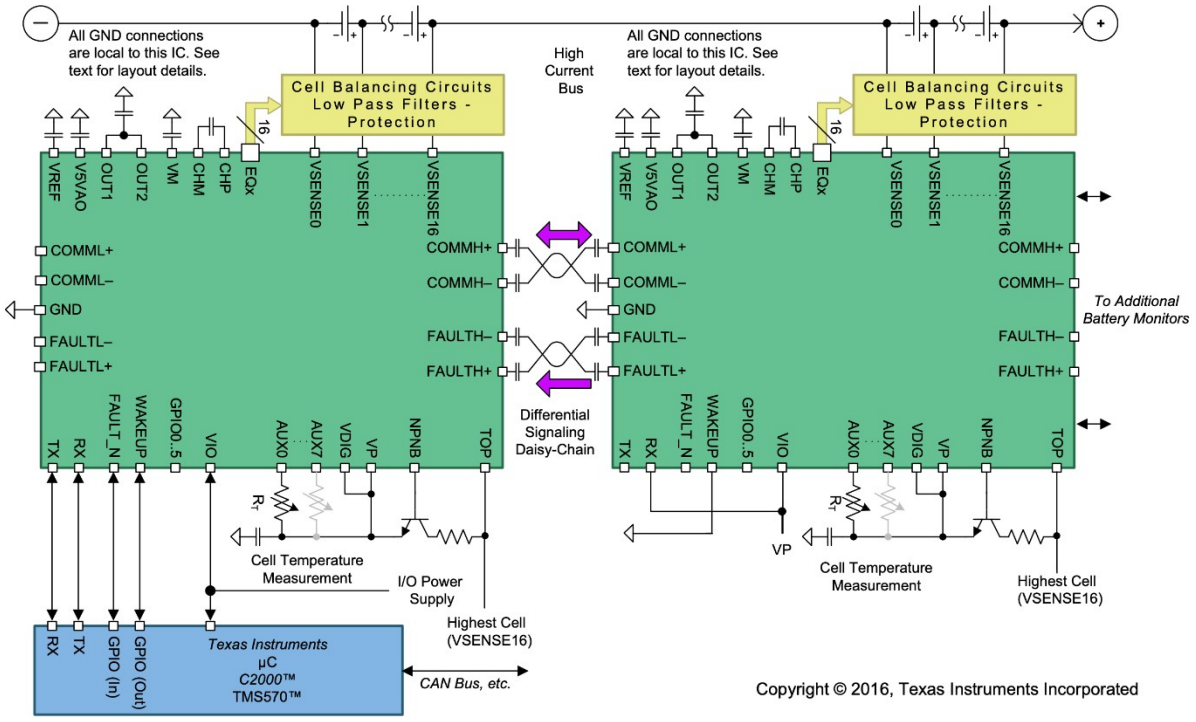

Figure 6 : Le circuit intégré de gestion de batteries à 16 cellules bq76PL455A cible les applications industrielles, en utilisant l'isolement capacitif pour relier jusqu'à 16 dispositifs avec un câblage à paires torsadées communiquant à une vitesse pouvant atteindre 1 Mbps via une disposition en chaîne. (Source de l'image : Texas Instruments)

Le CAN 14 bits utilise une référence interne et toutes les sorties des cellules sont converties en 2,4 millisecondes (ms). Le bq76PL455A surveille et détecte plusieurs anomalies différentes, notamment la surtension, la sous-tension, la surchauffe et les défauts de communication. Il prend en charge l'équilibrage passif des cellules à l'aide de transistors à effet de champ FET à canal N externes, ainsi que l'équilibrage actif à l'aide de circuits d'attaque de grille de matrice de commutation externes.

Ce système BMS permet de gérer facilement des chaînes comportant moins de 16 cellules, ce qui est un maximum. Seule restriction : les entrées doivent être utilisées dans l'ordre croissant, toutes les entrées non utilisées étant reliées ensemble à l'entrée de l'entrée VSENSE_ la plus utilisée. Par exemple, dans une conception à 13 cellules, les entrées VSENSE14, VSENSE15 et VSENSE16 ne sont pas utilisées (Figure 7).

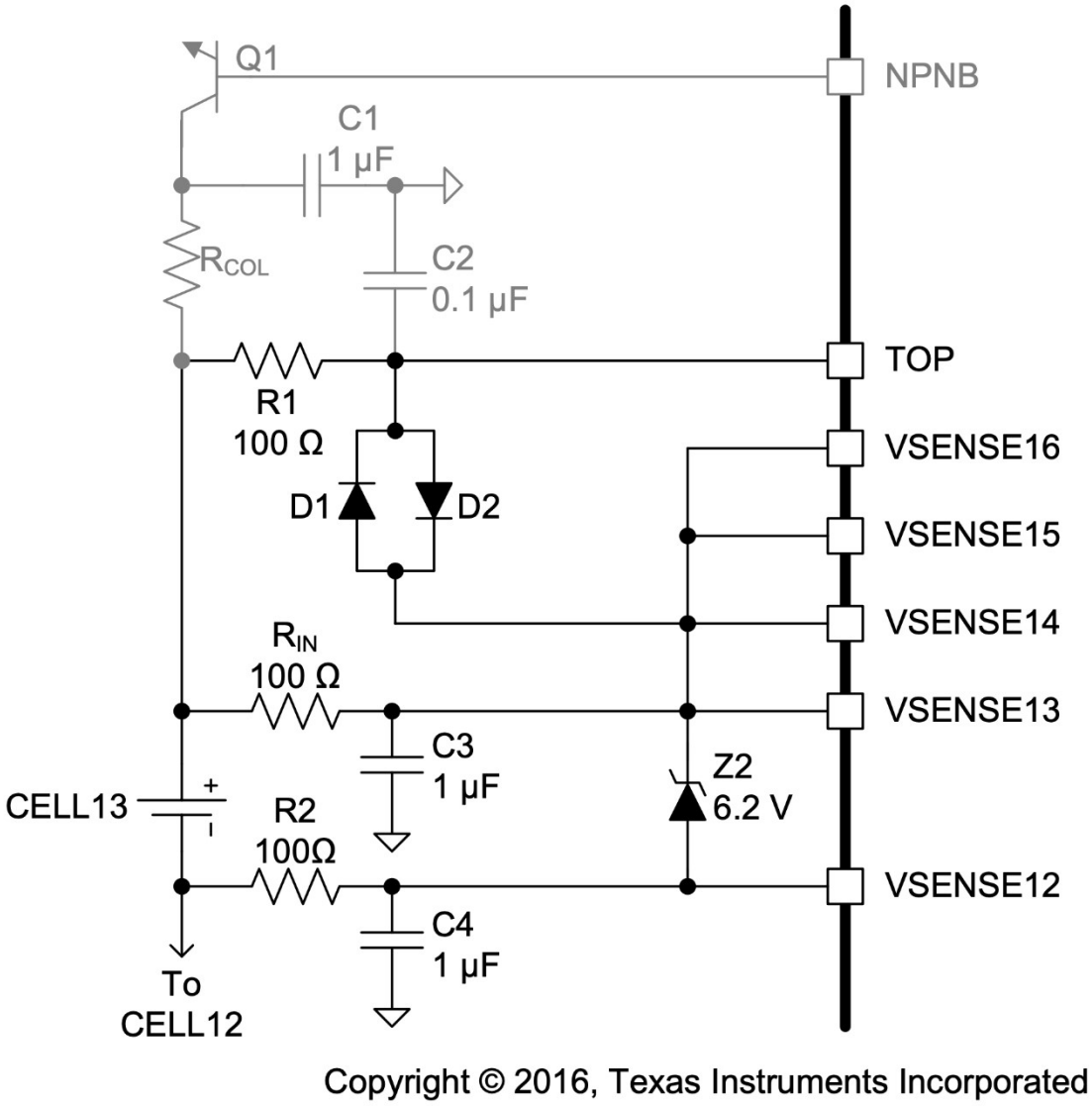

Figure 7 : Le bq76PL455A peut être utilisé avec moins de 16 cellules ; dans ce cas, les entrées des cellules non utilisées doivent être les plus élevées de la chaîne. (Source de l'image : Texas Instruments)

D'autres circuits intégrés, tels que le bq79616PAPRQ1 de Texas Instruments, prennent en charge la configuration en anneau et la communication bidirectionnelle, ce qui permet au système de continuer à surveiller l'état de santé et la sécurité du bloc-batteries (Figure 8).

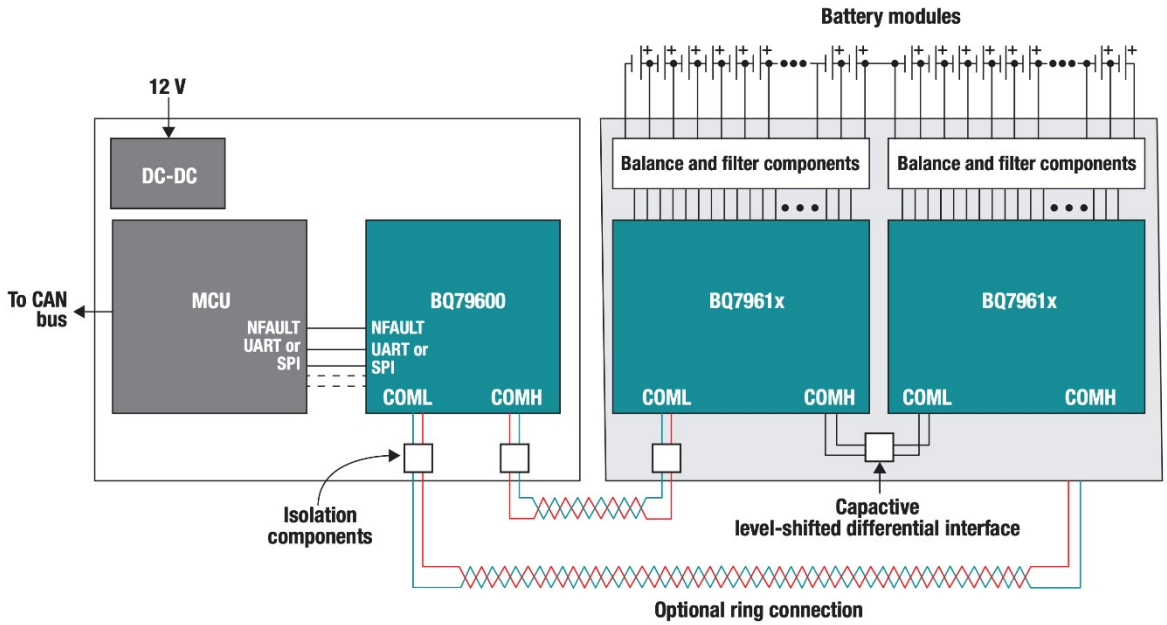

Figure 8 : Le bq79616PAPRQ1 prend en charge une topologie en anneau bidirectionnelle pour un chemin de connectivité supplémentaire en cas de rupture de fil ou de défaillance de nœud. (Source de l'image : Texas Instruments)

En cas d'anomalie, de circuit ouvert ou de court-circuit entre deux des circuits ASIC de surveillance des batteries dans cette configuration, le processeur de commande peut continuer à communiquer avec tous les circuits ASIC de surveillance des batteries en inversant le sens de la transmission des messages vers l'avant et vers l'arrière. Ainsi, si la communication normale est perturbée, le système peut maintenir la disponibilité en utilisant la tolérance aux défauts de la fonctionnalité de communication en anneau, et ce, sans perte des informations de tension et de température des modules de batterie. Pour les concepteurs qui souhaitent expérimenter avec le bq79616PAPRQ1, Texas Instruments propose la carte d'évaluation BQ79616EVM.

• *LTC6813-1 d'Analog Devices, Inc. :* le LTC6813-1 est un moniteur de piles de batteries multicellules, qualifié pour l'industrie automobile, qui mesure jusqu'à 18 cellules de batteries connectées en série, avec une erreur de mesure totale inférieure à 2,2 mV, grâce à son CAN delta-sigma 16 bits avec filtre antiparasite programmable (Figure 9). Notez qu'il s'agit d'un nombre de cellules supérieur à celui pouvant être pris en charge directement par certains des autres circuits intégrés. Les 18 cellules peuvent être mesurées en moins de 290 microsecondes (µs), et des taux d'acquisition de données inférieurs peuvent être sélectionnés pour une plus grande réduction du bruit.

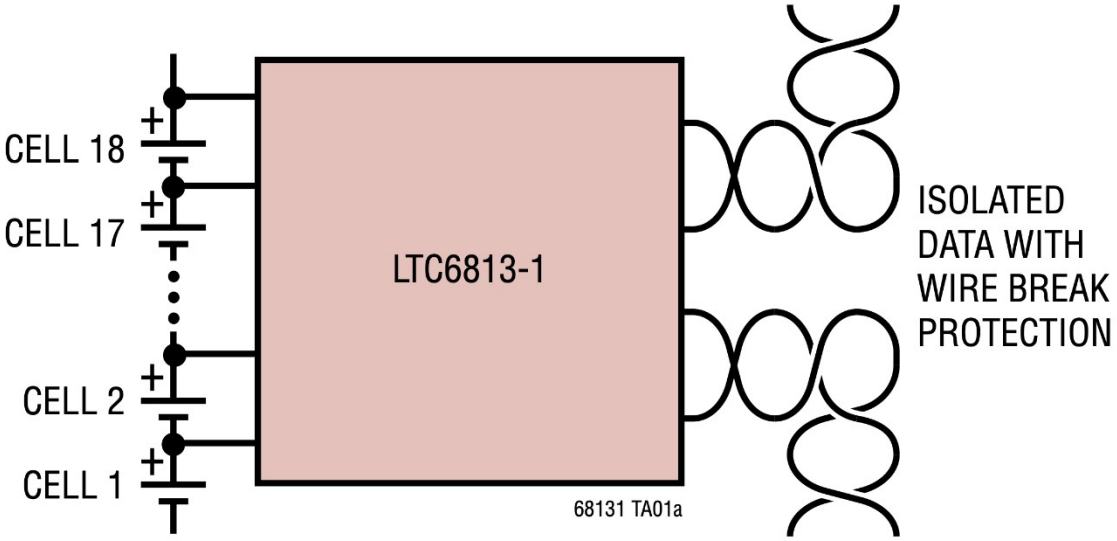

Figure 9 : Le LTC6813-1 prend en charge le plus grand nombre de cellules (18) et utilise un CAN 16 bits pour obtenir une précision de 2,2 mV et un balayage à haute vitesse des cellules. (Source de l'image : Analog Devices, Inc.)

Plusieurs dispositifs LTC6813-1 peuvent être connectés en série, permettant ainsi la surveillance simultanée de longues chaînes de batteries à haute tension. Le LTC6813-1 prend en charge deux types de ports série : une interface SPI standard à quatre fils et une interface isolée à deux fils (isoSPI). Le port non isolé à quatre fils convient aux liaisons à plus courte distance et à certaines applications autres que l'automobile (Figure 10).

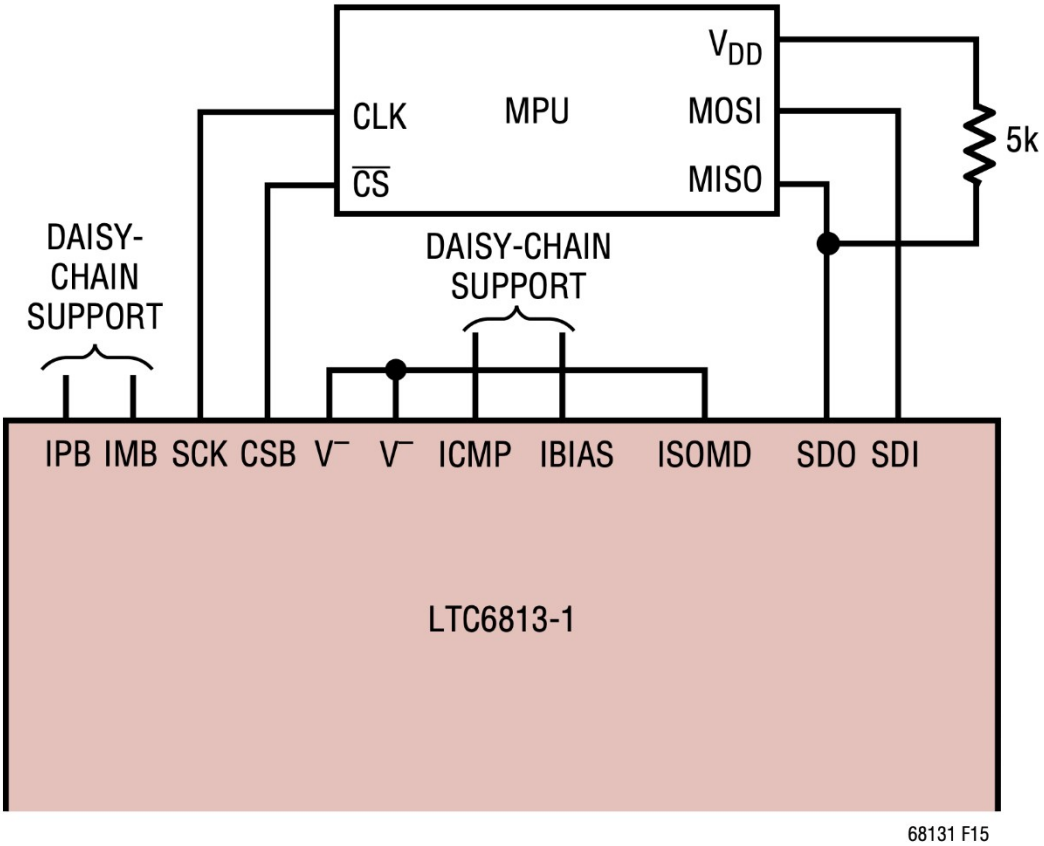

Figure 10 : Le LTC6813-1 prend en charge une interconnexion SPI standard à quatre fils pour les liaisons à plus courte distance et certaines applications autres que l'automobile. (Source de l'image : Analog Devices, Inc.)

Le port de communication série isolé de 1 Mbps utilise une seule paire torsadée pour des distances allant jusqu'à 100 mètres (m) avec une faible susceptibilité aux interférences électromagnétiques (EMI) et de faibles émissions, car l'interface est conçue pour de faibles taux d'erreurs de paquets, même lorsque le câblage est soumis à des champs RF élevés. La capacité bidirectionnelle de cette chaîne garantit l'intégrité de la communication, même en cas de défaillance, comme un fil rompu sur le chemin de communication.

En mode de configuration bifilaire, l'isolement est assuré par un transformateur externe, les signaux SPI standard étant codés en impulsions différentielles. L'intensité de l'impulsion de transmission et le niveau de seuil du récepteur sont réglés par deux résistances externes, R_{B1} et R_{B2} (Figure 11). Les valeurs des résistances sont choisies par le concepteur pour obtenir un compromis entre la dissipation de puissance et l'immunité au bruit.

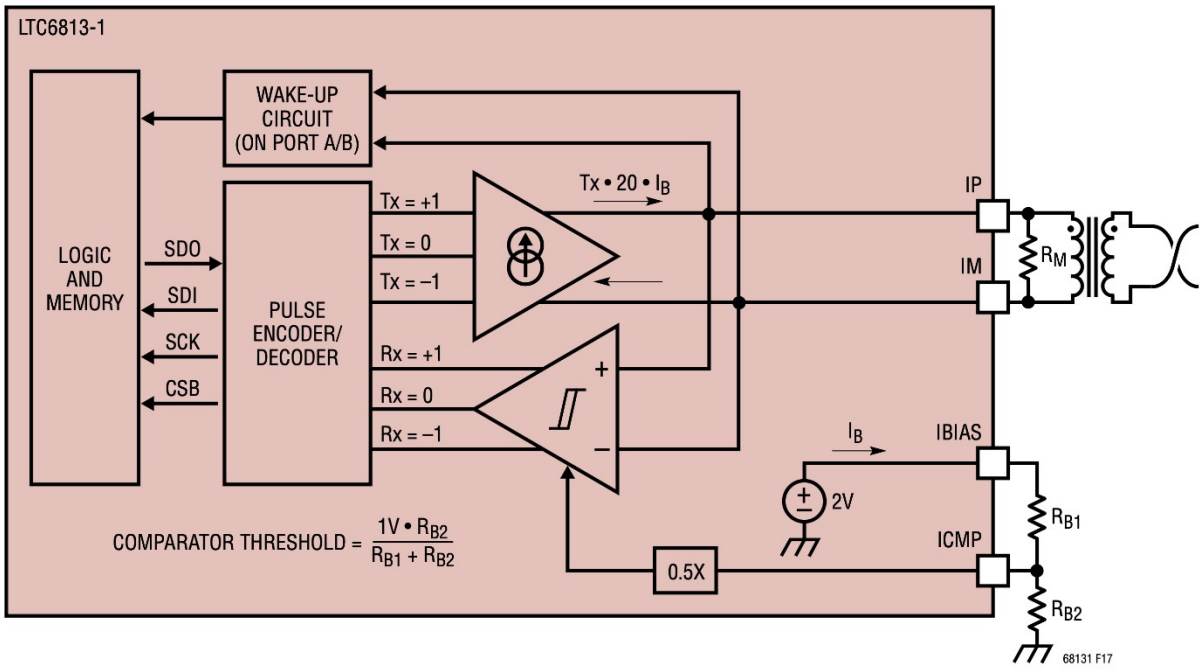

Figure 11 : Le LTC6813-1 offre également un port de communication série à 2 fils, 1 Mbps, isolé par transformateur, via une seule paire torsadée, pour des distances allant jusqu'à 100 m, avec une faible susceptibilité aux interférences électromagnétiques et de faibles émissions. (Source de l'image : Analog Devices, Inc.)

Le LTC6813-1 peut être alimenté directement par la pile de batteries qu'il surveille ou par une alimentation isolée distincte. Il comprend également un équilibrage passif pour chaque cellule, ainsi qu'une commande individuelle du rapport cyclique par modulation de largeur d'impulsion (PWM).

Conclusion

La mesure précise de la tension, du courant et de la température d'une seule cellule ou d'un petit bloc-batteries ne comportant que quelques cellules, représente un défi technique modeste. En revanche, la mesure précise de ces mêmes paramètres sur des cellules individuelles dans une chaîne en série - et ce dans des environnements automobiles et industriels difficiles avec un

décalage temporel négligeable d'une cellule à l'autre - constitue un défi majeur en raison du grand nombre de cellules, de la tension de mode commun élevée, du bruit électrique, des exigences réglementaires et d'autres problèmes.

Comme décrit précédemment, les concepteurs peuvent se tourner vers des circuits intégrés spécialement conçus pour ces applications. Ils permettent une isolation galvanique, une précision et un temps d'analyse rapide, nécessaires à la résolution de ces problèmes. Ils fournissent ainsi des résultats précis et exploitables qui permettent de prendre des décisions cruciales et stratégiques en matière de gestion des batteries.

www.digikey.fr