

電気自動車向けバッテリの性能向上を支える電子技術

Mike Kultgen, Design Manager, Signal Conditioning Products, Linear Technology Corp.

電気自動車やハイブリッド車の性能と安全のカギを握るのが車載バッテリの電子回路技術です。最新の設計技術で開発された IC を利用すれば、バッテリ・パックの設計者はリチウムイオン・バッテリの性能をさらに引き出すことができます。計測精度の向上とデータリンクの堅牢性強化、ならびにセル間をアクティブ・バランスすることにより、システムコスト削減、バッテリ寿命の延長、充電時間の短縮を実現します。

図 1 のブロック図にあるように、標準的なバッテリ・パックは、直列接続されたリチウムイオン・セルのグループが複数収められており、グループごとに実装された高電圧アナログ IC による測定結果をもとにセル・バランスを取る仕組みになっています。これらのアナログ・フロント・エンド(AFE)IC は、セルごとの電圧、電流、温度を計測して、計測データを制御回路に送るという難しい役割を担い、このデータに基づいてコントローラが充電状態とバッテリ・パックの健全性を計算して、該当するセルの充電または放電をフロント・エンド IC に指示します。このようにして、バッテリ・パック内のセル間の充電状態を均等化し、バランスが保たれるようにします。

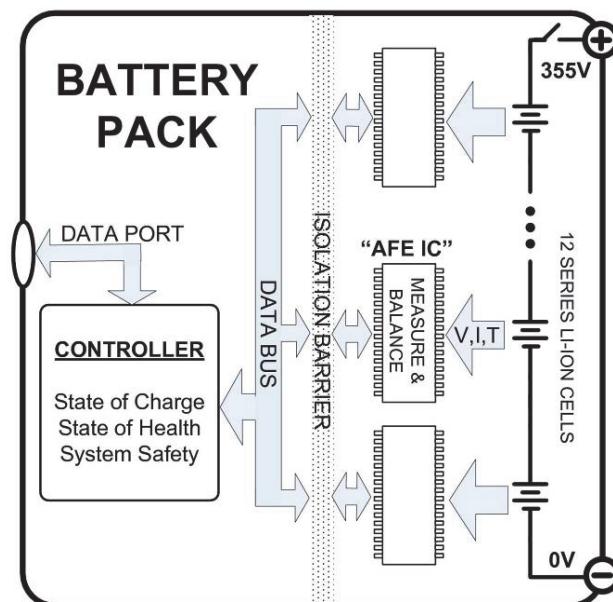


図 1 バッテリ・パックのブロック図

計測精度の向上によるコスト・ダウソ

AFE IC の計測精度はシステムのコストに直接、影響を与えます。有用な充電状態(SOC)を計算するには、高い計測精度が必要です。経年劣化を抑えるために、バッテリ・パックは

通常 SOC で 20%から 80%の間で用いられます。SOC の計算に 5%の誤差が見込まれる場合は、バッテリ・パックのサイズを 5%増やして余裕を持たせておく必要があります。セルのコストはコスト全体に大きく影響します。16kW-hr パックの容量を 5%増やすには、約 ¥36,000(ヨーロッパ 360€、US \$460)かかりますが、SOC の計算誤差を 1%まで改善すれば、パック 1 個当たりのコストを ¥30,000(ヨーロッパ 300€ US \$385)近く節約できます。

セルの電圧測定は SOC アルゴリズムのキーとなる重要な要素です。3.3V LiFePO₄(リン酸鉄リチウム)セルは全計測誤差 1mV で計測する必要があります。IC の製造業者とバッテリ・パック開発メーカーはこれを実現するために、全力で取り組んでいます。

¥48,000(ヨーロッパ 480€、US \$615)の Fluke-289 ハンドヘルド・マルチメータのようなラボ用機器では、3.3V を 1mV の誤差範囲で測定することは、当然のことですが、AFE IC は同じ性能を 1/100 のコストで、しかも自動車に搭載された状態で 15 年間発揮するよう求められます。このような高い目標を達成できる IC 技術を持つメーカーは、数えるほどしかありません。

実際の使用環境における精度

バッテリの計測に最適なキーとなる IC 技術は何でしょう。それは、図 2 の標準的な AFE IC のブロックで生じる誤差を限りなくゼロに近づける技術です。このブロックの動作原理は次のようなものです。マルチプレクサ(MUX)ブロックが直列接続された 12 個のバッテリ・セルの 1 つを選択します。「S」スイッチを閉じると、このセル電圧がコンデンサに充電されます。次に、「S」スイッチを開いて、「T」スイッチを閉じます。これで、選択したバッテリ・セルの電圧が ADC に伝えられます。このような「フライング・コンデンサ」が設置されていると、最上部のセルの同相電圧が 33V と高圧であっても、除去されて、差動電圧の 3.3V を蓄えます。アナログ・デジタル・コンバータ(ADC)はこのセル電圧を電圧リファレンスと比較し、VREF(基準電圧)と VCELL(セル電圧)の比率に比例したデジタル値を生成します。

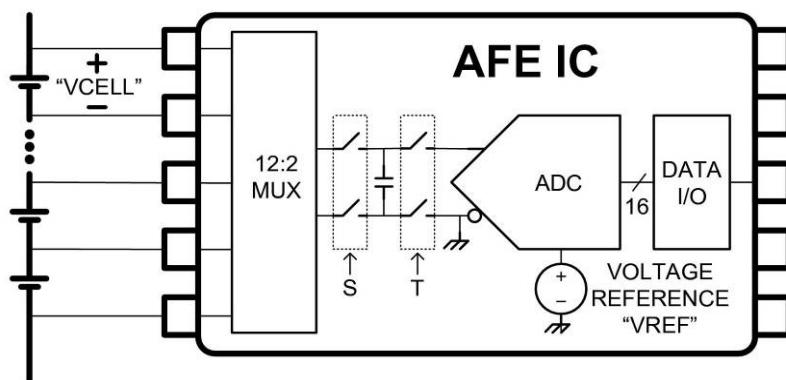


図 2 標準的なアナログ・フロント・エンド (AFE) IC

スイッチのインピーダンスが大きすぎて短いサンプリング時間中にコンデンサを完全に充電できないと、MUX とフライング・コンデンサが計測誤差を取り込んでしまいます。この誤差を生ずる時間を無くすためには、スイッチドキャパシタ回路を設計する際に十分に考慮する必要があります。

ADC と周辺素子との不適合により、ADC による A/D 変換においても誤差が発生することがあります。この誤差についても、設計の際に十分に考慮した上で、各素子のトリミングを併せて行うことで、軽減することができます。

AFE IC の基本的な性能限界は基準電圧源の性能に基づく

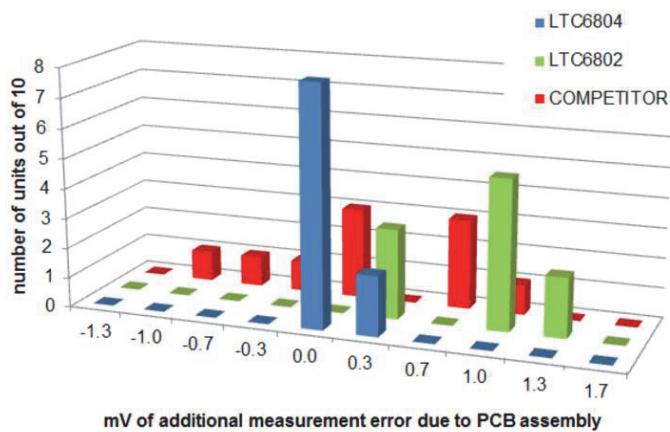
基準電圧が 1% 低くずれるとすべての読み取り値が 1% 大きくなります。電圧リファレンス（基準電圧源）は、逆バイアスされた PN 接合のアバランシェ降伏電圧（ツエナー・リファレンス）、2 つのベース・エミッタ電圧の差（バンドギャップ・リファレンス）、またはコンデンサに充電される電荷（EPROM リファレンス）のいずれかの物理量によって生成されます。AFE IC は製造工程において電圧リファレンスの初期値がきわめて正確になるようにトリミングされます。しかし、残念なことに、採用する IC 技術によっては、電圧リファレンスは時間、温度、湿度、プリント回路基板（PCB）アセンブリのストレスにより大幅に変動します。そのため、いくつかのメーカーは精度について Typ 値のみを表示するだけで、実際の環境下において AFE IC が精度についてどのように振る舞うか情報を提供していません。

過酷な車載環境で使用するのに最も適しているのがツエナー・リファレンスです。リニアテクノロジー社の新製品、LTC6804 AFE バッテリ・スタック・モニタ IC は、ツエナー電圧リファレンス技術を用いて、要求を充分に満たす高精度を何年間も維持します。バンドギャップ電圧リファレンスを採用していた前世代の製品と比べ、LTC6804 の精度は劇的に向上しています。例えば、PCB のアセンブリ工程で AFE IC が受けるストレスについて考えてみましょう。AFE IC は半田付け工程で熱衝撃を何度も受けます。シリコンは、プラスチック・パッケージと銅リード・フレームの伸縮によって機械的ストレスを受けます。バンドギャップ・リファレンスは、歪み計のように変化し、機械的ストレスをリファレンス電圧の変動に変換してしまい、それが電圧誤差となって現れます。電圧リファレンスの誤差はセルの測定精度の低下に直接影響します。図 3 は PCB アセンブリのストレスの影響を示すものです。3 種類の AFE IC についてそれぞれ 10 個の熱衝撃を受ける前後の変化を示しています。3.3V のバッテリ・セルを想定した場合のリファレンスの変化を mV 単位で表示しています。

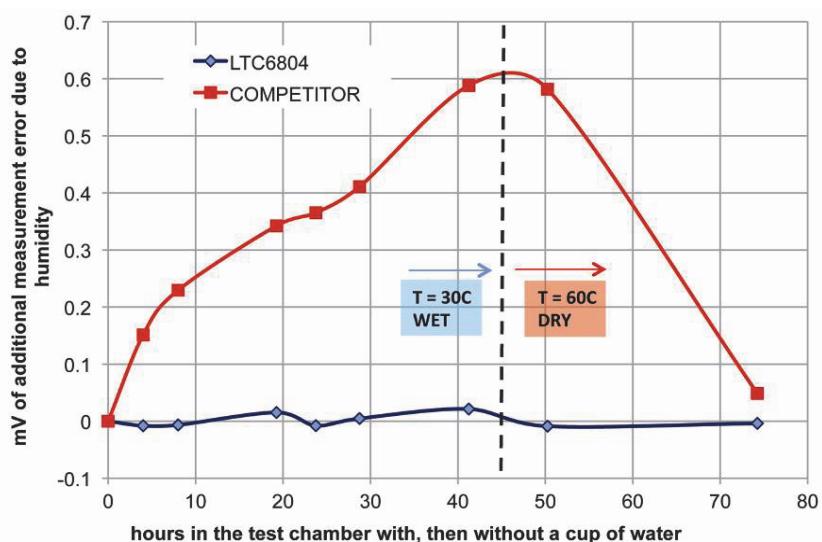
湿度も考慮する必要があります。プラスチック・パッケージ内に入り込んだ湿気によって機械的ストレスが変化します。電圧リファレンスがストレスで変化すると電圧測定値が変化します。結局、電圧リファレンスの値は長期間にわたってドリフトしていきます。IC パッケージのアセンブリ工程はシリコンにストレスを与えます。このストレスは長時間かけてゆっくりと解放され、電圧リファレンスの変化を引き起こします。この影響は数千時間、動作した後に

減少していきます。長時間ドリフトの仕様が ppm/ $\sqrt{\text{kHrs}}$ の単位で表記されるのはこのためです。図 3 は 3000 時間後のドリフトの測定値と、15 年後の予測値を示したものです。

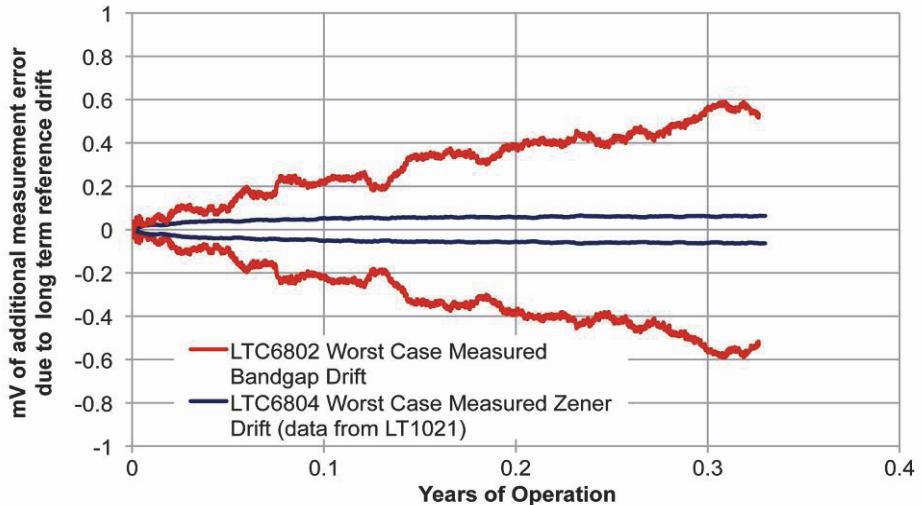
このように、セルの計測精度を高めることにより性能はさらに向上すると言えます。実際のアプリケーションにおいて高い計測精度を得るには、ツェナー電圧リファレンスを採用した AFE IC を用いて構成するのが最適であることは、図 3 の製品比較で明らかです。



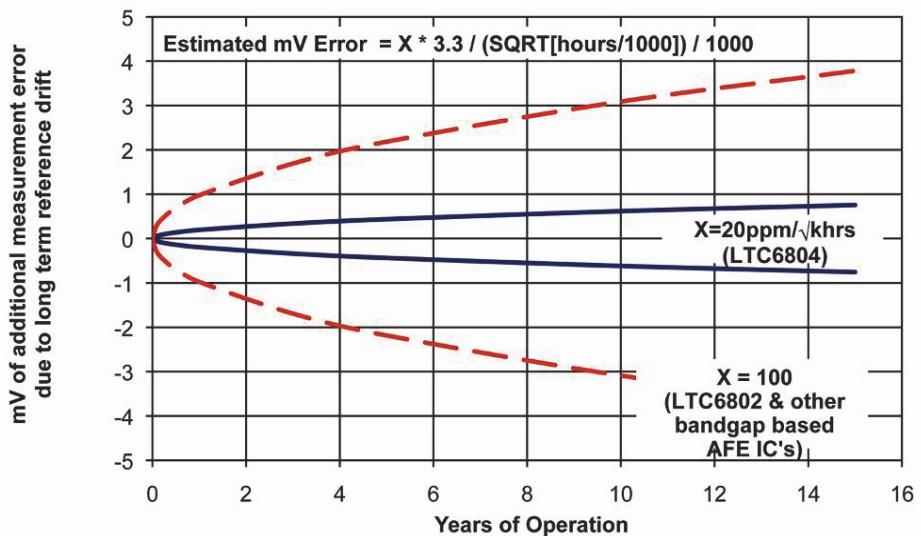
(a) PCB アセンブリ・ストレス



(b) 湿度の変化



(c)リファレンスのドリフトの測定値



(d)長期間におけるリファレンス・ドリフトの推定値

図 3 製造後の測定誤差。現実の要因による 3.3V バッテリ・セルの測定誤差

新しい絶縁データリンクを用いたバッテリ・パックのモジュール化

バッテリ・パックの設計者はシステムのモジュール化に高い関心を寄せています。16kW-hr 容量のバッテリを車両の 1 つの区画にうまく収めるのは難しいかもしれません。また、保守と保証にかかる費用を抑えることを考えても、¥ 800,000 (ヨーロッパ 8000€、US \$10,235) のパックを小さなモジュールに分割したほうが望ましいと言えます。単体のモジュール・パックのサイズは、各種の車両プラットフォームの要求に合わせて、自在に設計できます。

大きなバッテリ・パックを小さなモジュールに分割する場合、電気的接続の設計が複雑になります。バッテリ・モジュールと制御回路との間でデータを送受するためのワイヤハーネスが必要です。ワイヤハーネスは過酷な電磁妨害(EMI)に曝されます。したがって、データ通信のハードウェアとソフトウェアは慎重に検討しなければなりません。AFE IC の新技術は、パックを EMI から保護してデータ通信のコストを劇的に低減することができます。

モジュール・バッテリ・パックを搭載した 2012 年の生産車両では、図 4 に示すように、コントローラ・エリア・ネットワーク(CAN)通信とデジタル・アイソレータを組み合わせた技術が標準的に用いられています。CAN は差動通信方式を用いた堅牢性の高い通信を提供します。CAN プロトコルのデータは、小型マイクロプロセッサ(MPU)によって、AFE IC で用いられる簡易な SPI や I²C プロトコルに変換されます。モジュール間の絶縁はデジタル・アイソレータ IC によって行われますが、この方法では場合によっては絶縁型電源が必要になります。CAN トランシーバ、MPU、アイソレータ IC にかかるコストは合わせて ¥350 (ヨーロッパ 3.5€、US \$4.50) ほどです。

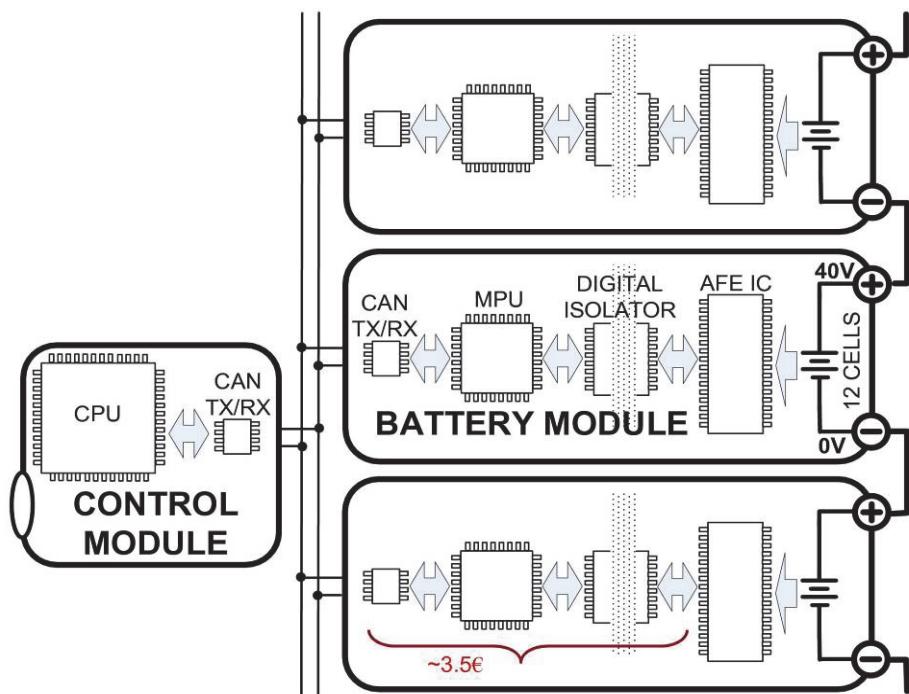


図 4 CAN を用いた絶縁データ通信

新しい AFE IC である LTC6804 はコストの低減、CAN ソフトウェアの簡易化、モジュール間での堅牢性が高く絶縁された 2 ワイヤ式データ転送を可能にします。図 5 に LTC6804 の isoSPI™ ポートにシンプルなパルス・トランスを結合してバッテリ・モジュール間を配線する方法を示します。この方法では、リニアテクノロジー社製 LTC6820 絶縁 SPI インタフェース IC を用いて、あらゆるマイクロプロセッサの SPI ポートと isoSPI™ バスを接続します。LTC6820 はマイクロプロセッサからのクロック、データ、チップセレクト信号を差動パルスに

変換します。LTC6804 でこれらのパルスを再度クロック、データ、チップセレクト信号に変換します。マイクロプロセッサにとっては LTC6804 AFE IC は単に SPI 周辺デバイスのように見えます。このようにシンプルな isoSPI™ バスは、同時に電気的絶縁と EMI 耐性をも提供します。

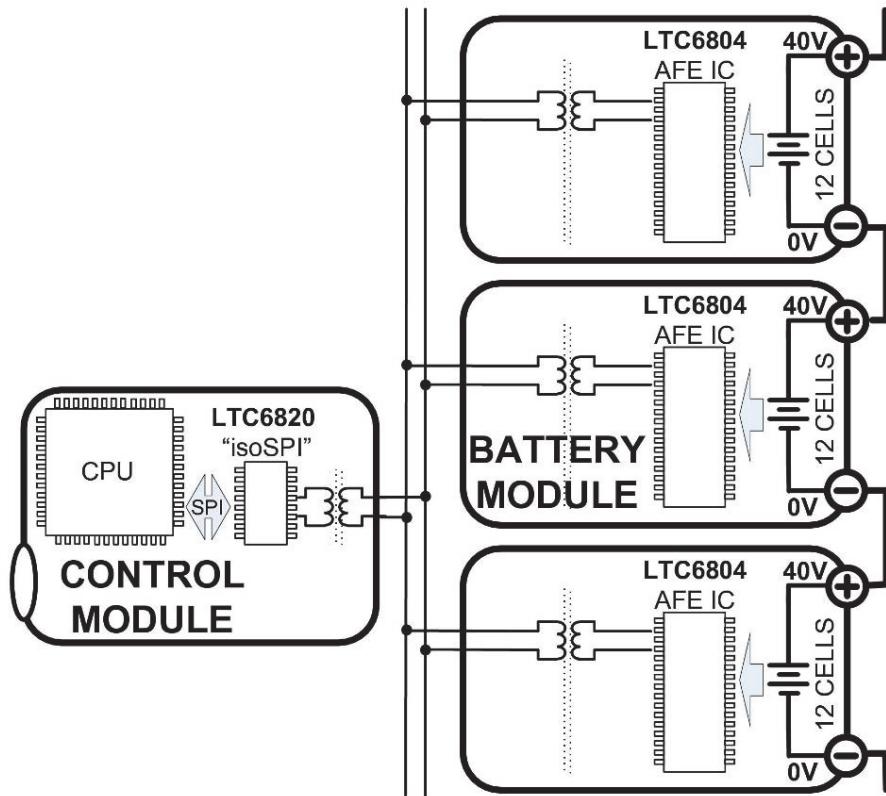


図 5 isoSPI™ を用いた絶縁データ通信

isoSPI™ パルスの信号強度と 2 ワイヤ接続のインピーダンスは調整可能で、抵抗値(非図示)を変えることで信号電流を増加させることができます。このようにして信号電流を増加調整すれば isoSPI™ バスを、100 メートルのケーブルを用いた通信環境に合うように調整し、高妨害電磁波から保護できます。LTC6804 AFE IC は 15 ビット巡回冗長検査(CRC)によってデータの完全性を保証します。図 6 に、バルク電流注入(BCI)テストの結果を示します。BCI は電磁妨害に対するシステム耐性を表します。ケーブル周りにクランプしたプローブを介して、RF エネルギーを注入します。別のプローブを使って、発生した RF 電流を測定します。また、ケーブル経由でデータパケットを送信し、CRC チェックによりデータが破損していないかどうかを調べます。このテストは isoSPI™ データパルスの強度を数段階切り換えながら、繰り返し行います。20mA の isoSPI™ データパルスは 200mA の RF 注入に対して耐性があります。

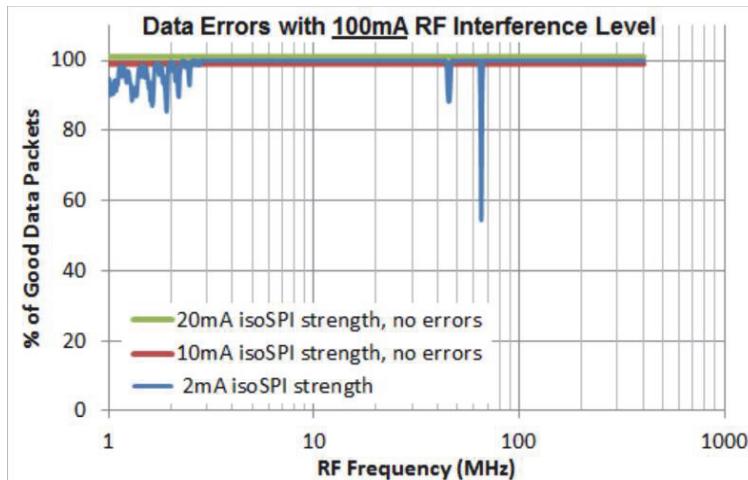


図 6 isoSPI™ の RF 妨害に対する耐性

アクティブ・バランスによる充電速度のアップとエネルギーの増加

直列接続されたバッテリ・セルはセル間の均等化が必要です。自己放電速度、電気的負荷、温度はセルごとに異なります。したがって、充電・放電のサイクルを何度も繰り返していくうちに、セルの充電状態の不均等が無視できないほど大きくなってしまいます。充電状態に不均等が生じるとパック容量が低下します。例えば、1つのセルが他のセルよりも 10% 多く充電されているとき、ある電流値でこのパックを充電するとします。10% 多く充電されていたセルが充電上限状態の 80%まで充電されたとき、それ以外のセルは 70%までしか充電されません。つまり、パック全体の有効エネルギーは 10% 減少することになります。負荷抵抗を介して単一セルの電荷を消散させるパッシブ・バランスは、直列スタック内の不均等なセルを、最も安価に、最も簡単に均等化できるため、ほとんどの AFE IC で取り入れられています。

しかし、パッシブ・バランスはエネルギーの使い方が非効率で均等化が低速です。平均的な均等化電流はセル容量の 1% ~5% の範囲です。40 A-hr のバッテリの電荷の 10% を消失させるのに、 $I=400\text{mA}$ で 10 時間かかります。 $I=2\text{A}$ では、セル当たり 8W の熱を生成します。ほとんどのセルでセルの均等化が必要ですが、大容量のパックでは、パッシブ・バランスで生成される熱に対処できません。そのため、大容量のパックでは、高効率で、高電流に均等化が可能なアクティブ・バランスが唯一の有効なソリューションとなります。

アクティブ・バランスは少ない発熱量で充電速度を上げるだけでなく、容量の回復を助けます。セルは経年変化によって容量が減少していきます。パック内の温度が一定でないことやセルの製造時の個体差から、経年変化はセルによって異なります。修理の際にセルが交換されると、容量に差異を生じます。パッシブ・バランスでは、最も小さな容量のセルによってパック全体の容量が決まります。パックのバランスを調整して 80%まで充電したとします。このパックの放電は、最も小さな容量のセルが 20%まで放電されたときに停止します。一方、適切に設計されたアクティブ・バランス・システムでは、電荷が必要に応じて効率

的にスタック全体に再配分されて、最も小さな容量のセルではなく、平均的な容量のセルに基づいて 20% と 80% の充電状態が達成されます。バッテリ・パックの稼働時間を最大にするには、バッテリストックの放電時と充電時の両方においてセルのバランスが取れている必要があります。

LTC3300 を使用すれば、車載バッテリ・パックのアクティブ・バランスを実現できます。LTC3300(図 7)は大型バッテリ・システムの双方向アクティブ・バランスのニーズに対応するよう設計されています。

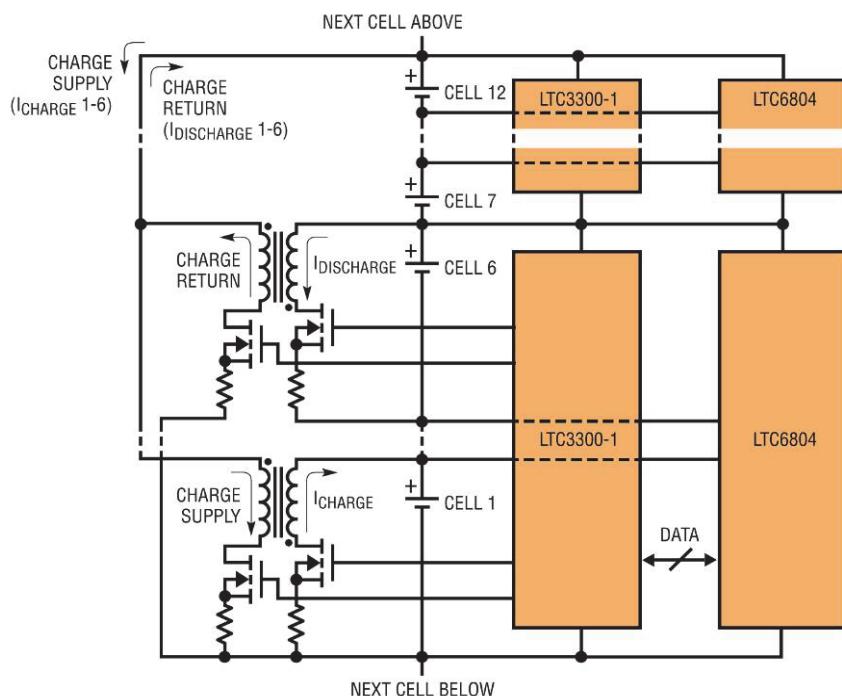


図 7 LTC6804 と LTC3300 を用いたモニタとアクティブ・バランスのソリューション

非絶縁型同期フライバック・トポロジーを用いて 12 個以上の隣接セルの中から最大で 6 個のセルのバランスを同時に調整できます。バランス電流は 10A まで可能です。1 個の 12 セル・モジュールから隣接するモジュールへの電荷転送は、各フライバック・トランジスタの 2 次側を交互接続することで達成されます。標準的なセル間ミスマッチ状態に対して、非常に大きなバッテリ容量回復値(>80%)と非常に高効率(>92%)な転送エネルギーを達成できます。LTC3300 は LTC6804 のシリアル・ポートを介して制御可能です。この 2 つの IC を用いて、精度が高く使いやすいセル監視と均等化システムを構築できます。

新しい IC による性能向上とコスト低減

LTC6804 などの計測 IC は高い計測精度と長期安定性が保証されているので、バッテリ・パックはセルから最大のエネルギーを引き出すことができます。isoSPI™ などの簡単な絶縁 2 ワイヤ通信構成を用いて、コンポーネントのコストを最小限に抑えながら電磁妨害に

に対する耐性を達成できます。LTC3300 のアクティブ・バランス IC は充電速度を上げて、バッテリ容量を最大化します。これらの優れた最新技術による IC は次世代電気自動車やハイブリッドカーに搭載するバッテリ・パックに最適です。