

Technical White Paper

電気化学インピーダンス分光法による次世代のバッテリー モニタリング



Brian Burk
Systems Engineer, Battery Management Solutions

概要

電気自動車 (EV)、エネルギー ストレージ システム (ESS)、産業用ロボットなどの大電力アプリケーションでのバッテリーの採用は、バッテリー管理の監視と制御の分野で継続的に革新を推進しています。次世代のバッテリー管理システム (BMS) では、バッテリー寿命を延ばし、最高の信頼性を確保して、ユーザーと同乗者の安全性を最大限に高める必要があります。

欠陥バッテリーによるリコールやセルの過酷使用、さらに火災や財産損害に至るバッテリー パックの急速な破損といった事故は、複数のバッテリー ベンダおよび完成車メーカーの評判を著しく損ねる結果となっています。業界の主要メーカーおよび政府の規制当局は、次世代バッテリー製品の開発において、検知手法の高度化と安全性の向上を最優先課題に位置づけています。

こうした安全性と信頼性の課題を克服するため、設計者たちは、数十年にわたりバッテリーに適用されてきた手法である電気化学インピーダンス分光法 (EIS) の採用へと舵を切っています。EIS は、バッテリー セルを励起して電池の反応を監視するように設計された方法で、バッテリーの条件と状態を把握します。本プロセスでは、非侵襲的な電気信号を用いてバッテリーセルの多角的な監視を行います。これにより、バッテリーの温度、充電 (充電状態)、容量低下 (正常性の状態)、熱暴走の検知などに関する不可欠な情報をリアルタイムに提供します。

このホワイト ペーパーでは、バッテリー システムの設計者が直面している複数の課題と、EIS を活用して、より信頼性が高く長期的なバッテリー設計を実現する方法を説明します。

目次

1 概要.....	2
2 EIS を使用したバッテリーの分析.....	2
2.1 変更点法規制の強化が早期検出の加速を後押し.....	2
2.2 EIS とは.....	2
2.3 バッテリー EIS の仕組み.....	3
2.4 インピーダンス データの用途.....	3
2.5 EIS から得られるその他の情報.....	4
3 EIS の影響: 使用事例 3 例.....	5
3.1 熱暴走検出.....	5
3.2 急速充電.....	6
3.3 料金と利用可能状況.....	7
4 EIS の測定.....	8
4.1 EIS システム アーキテクチャ.....	8
4.2 EIS 測定のパラメータ.....	9
4.3 TI の EIS チップセット.....	10
4.4 リファレンス デザイン.....	10
5 まとめ.....	11

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 概要

EV セクタは過去 10 年間で劇的に成長しました。この変遷には、航続距離、充電速度、バッテリーの信頼性に関する初期の制限を克服するために、エンジニアリングの大幅な進歩が必要でした。それでもなお、懐疑派は航続距離への不安や、経年劣化によるバッテリー容量の低下を指摘しますが、以下のような技術革新によって、そうした懸念はすでに解消されつつあります。

- **バッテリー密度の向上。**セルのケミストリと製造の進歩を通じて 100Wh/kg から 300Wh/kg に向上。
- **充電インフラストラクチャの改善。**80% の充電に 8 時間以上かかっていた充電時間を 30 分未満に短縮。
- **より高精度のバッテリー監視機能。**高電圧、特定用途向けの高度な半導体を使用することにより、400V と 800V の各アーキテクチャにわたり、200 個を超えるセルを直列接続したパックを管理する能力を実現。

これらの改善にもかかわらず、バッテリーシステムの設計者は依然として、以下の 3 つの主要な課題に直面しています。

- **ライフ サイクル管理:**設計者は、リン酸鉄リチウム (LFP) やニッケル マンガン コバルト (NMC) などの高密度リチウムセルの信頼性と耐用期間を向上させる必要があります。これらのセルは温度変化、過充電、充電不足、急速充電などの高い充電レートに敏感であり、信頼性と安定性を確保するために、監視と制御の間で微妙なバランスを維持する必要があります。
- **経年劣化と容量減少:**バッテリーの経年変化に伴うセル容量の低下は、現在、モデル化は頻繁に行われているものの直接の測定は不可能なため、予測を困難なものにしています。こうした現象は、消費者がスマートフォンで経験する状況と同様です。新品時には 1 回の満充電で数日間稼働したバッテリーも、経年劣化により徐々に容量が減少し、最終的には初期容量のわずかな割合しか蓄電できなくなります。
- **安全性と熱暴走:**壊滅的な熱暴走を引き起こす、セルのストレスおよび損傷を検出することは、業界の圧力と政府の規制の両方に牽引され、業界の最も緊急の課題になっています。

これらの課題に対処するための新しいツールの採用は、条件が厳しいアプリケーションでのバッテリーシステムの安全性と信頼性の向上を目指しています。最も有望なテクノロジーのひとつが EIS です。EIS は、バッテリーの状態と条件をリアルタイムで把握し、設計者がセルの内部を効果的に確認できるようにします。

2 EIS を使用したバッテリーの分析

2.1 変更点法規制の強化が早期検出の加速を後押し

セルが自己発熱し、加圧して、最終的には燃焼し始める連鎖反応と定義される熱暴走は、急速に他のセルに拡散して、パック全体が発火する原因となり得ます。イベントを停止することはほとんど不可能であり、抑制することしかできません。

このため、バッテリー業界の専門家と政府の規制機関は、これを早期に検出して、ドライバに対する警告時間を長くするために、措置を講じています。

2020 年に、中国の Guobiao (GB) 38031 国家規格は、熱暴走警告の後、少なくとも 5 分間の出力時間を置くことを必須としました。2026 年 7 月に発効する GB 38031-2025 改訂では、あるセルが熱暴走に入ってから、パックの外側に火災や爆発が現れるようになるまでの時間が 2 時間以上になるよう延長します。

これらの規格は、自動車メーカー各社に、個別のセルレベルで熱暴走を検出し、可能な限り一刻も早く警告を出すよう厳しい圧力をかけるものです。残念ながら現在、この要件を確実に満たすソリューションはほとんどありません。テキサス インストルメンツ (TI) の次世代 BMS デバイスに統合された EIS 技術は、セルレベルの定量的な内部状態の把握を可能にする手段を提供します。

2.2 EIS とは

はじめに、EIS を細分化して詳述します。分光器は、多くのシステムで使用されている手法であり、周波数範囲全体で励起し、応答を測定する方法でシステムの特性を検出します。例えば、生体インピーダンス測定技術の分野では、高機能体組成計が様々な周波数の電流信号を体内に流し、筋肉、脂肪、および水分の量を測定することにより体組成を推計しています。

EIS の電気化学的部分は、バッテリーに同じ原理を適用します。電気信号はバッテリーの化学反応を測定します。セル内のリチウムの位置を追跡したり、アノードやカソードが損なわれていないかどうかを判断したりする測定は、モニタリングに有用な化学的特性です (図 2-1)。分光法の目的は、非侵襲的な方法でセル内部の周波数依存の挙動をより深く知ることです。

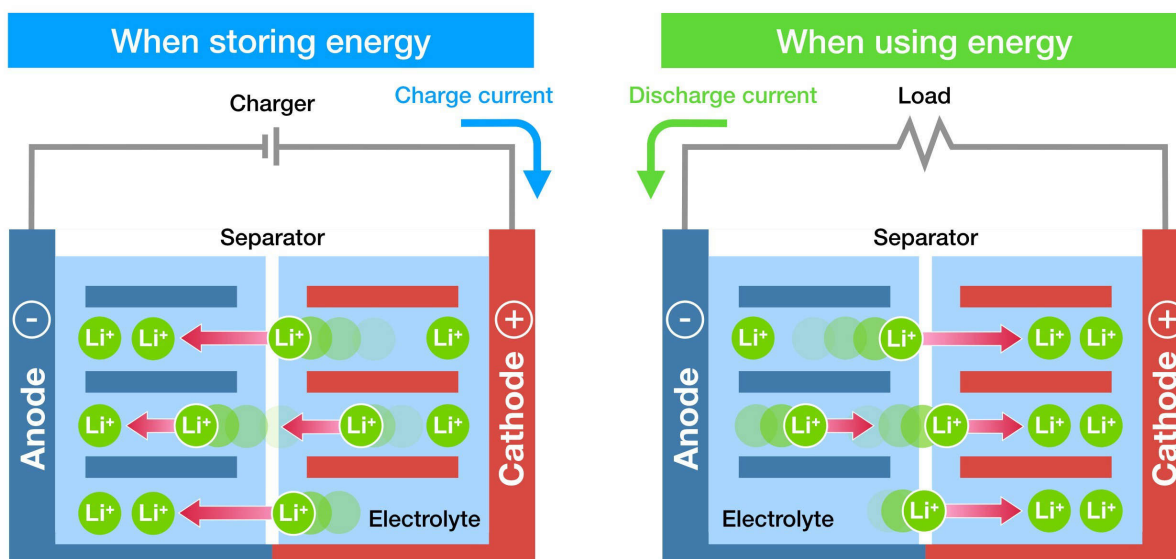


図 2-1. 充電時と放電時のバッテリー リチウム イオンのフロー

2.3 バッテリー EIS の仕組み

TI の [BQ79826Z-Q1](#) バッテリー モニタと [BQ79881-Q1](#) バッテリー ジャンクション ボックス パック モニタは、バッテリー セル、モジュール、またはパックに電流励起を印加し、応答電圧を測定します。図 2-2 に、バッテリー内の電流と電圧を示します。周波数全体での振幅の差 (インピーダンス振幅) と時間差 (インピーダンス位相) を比較し、時間、温度、充電、その他のバッテリー パラメータを監視することにより、セル内で発生している事象について詳細情報を得られます。

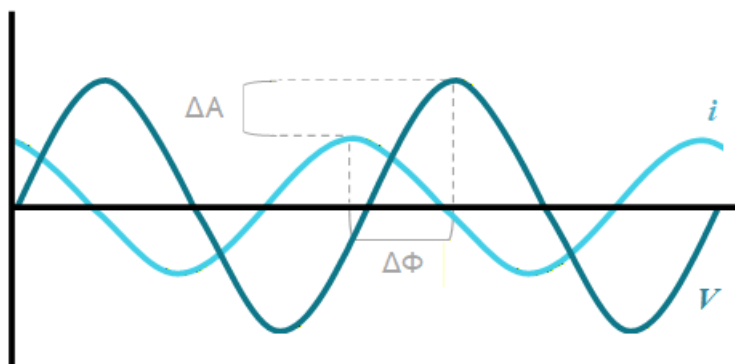


図 2-2. 電流と電圧を使用した EIS 測定

2.4 インピーダンス データの用途

インピーダンス測定機能を備えた BMS を有効にすると、インピーダンスに相関するバッテリー パラメータの識別に集中できるようになります。

ナイキスト プロットは、全周波数帯域のインピーダンスを視覚化する一般的な手法です。図 2-3 に、x 軸の実数インピーダンス、y 軸の虚数インピーダンスを示します。各ラインは、0.1Hz ~ 1kHz の周波数の掃引で構成されており、右側が最も低い周波数、左側が最も高い周波数です。図 2-3 のラインの色は、スイープ中のバッテリーの温度を示します。

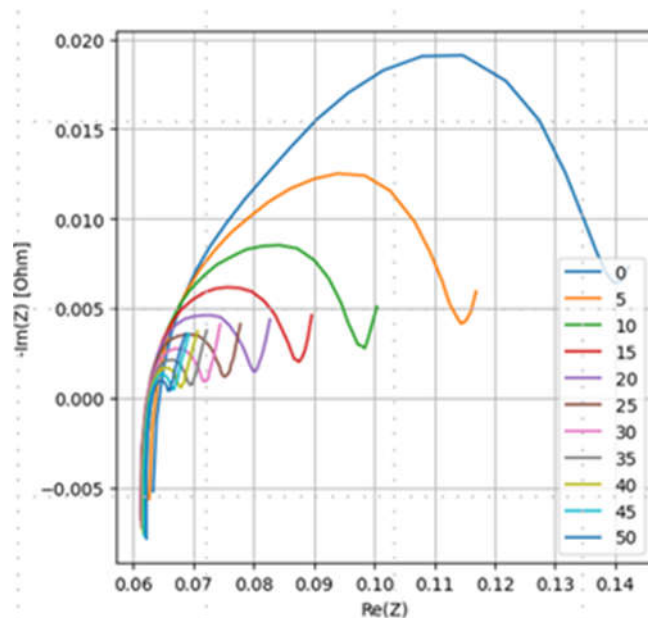


図 2-3. 温度とインピーダンスのナイキストプロットとの関係

プロットでは、インピーダンス曲線は温度に応じて形状変化します。さらに、500Hz での単一インピーダンスを表す黒い円は、温度の変化に応じて動きます。設計者はこの EIS ベースの温度データを使用して、バッテリーのコア温度の識別、充電中の温度スパイクの監視、システムで必要とされる温度センサの数の削減を実行できます。

2.5 EIS から得られるその他の情報

EIS は、単純な温度測定だけでなく、アノード、カソード、リチウム拡散、固体電解質間相 (SEI) 層の完全性、およびバッテリー動作に重要なその他のコンポーネントなど、特定のバッテリーコンポーネントに関する詳細情報を提供します。これらのパラメータは、ナイキストプロットの形状と周波数特性を詳細に分析することによって明確になります。図 2-4 に、EIS 解析で使用される周波数領域と等価回路モデルを示します。

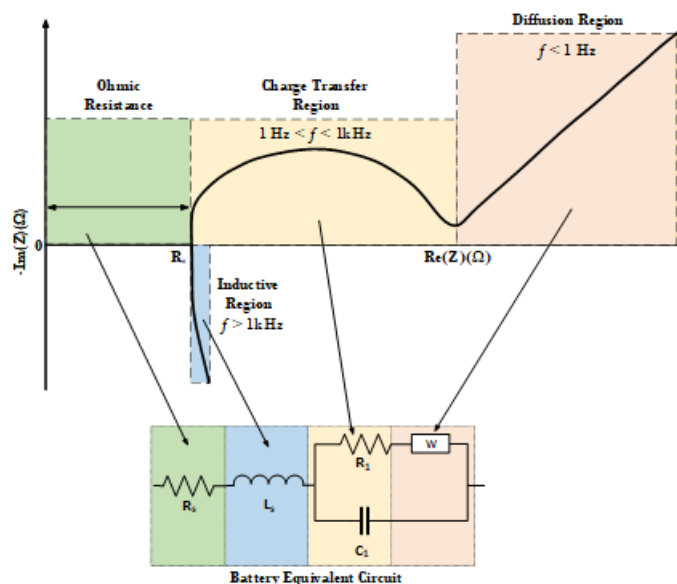


図 2-4. ナイキストプロット内のバッテリー部品の識別

色付きボックスで囲まれた領域やナイキスト領域は、バッテリーセルの特定の監視対象領域を強調しています。

- **抵抗 (緑色のボックス、水平ライン):** この領域は電解質の DC 抵抗を示します。これは、製造上の欠陥、組み立てのエラー、または自動車の衝突や嵐などの事象による損傷に起因する可能性がある、バッテリーの短絡がないかどうかを示します。
- **電荷伝達領域 (黄色のボックス、半円):** この領域は多くの場合、電極内でイオンと電子が接する電極 - 電解質界面の正常性を示します。この領域で監視されるセルの最も重要な物理的構成要素のひとつは、イオンと電子回路の結合と分離を可能にする SEI 層です。SEI 層が劣化し始めると、それは多くの場合、セルの経年劣化の進み具合を示しており、将来的なセルの故障を予測する有効な指標となります。
- **拡散領域 (赤いボックス、45 度ライン):** アノードおよびカソードにおけるリチウム拡散過程と関連して、この領域は、充電状態、正常性、およびセルがいつでも充電または放電できる能力を評価するのに役立ちます。

バッテリーセルの物理的なモデル化と車載 EIS 測定を組み合わせることにより、BMS はバッテリーの正常性、経年劣化、およびバッテリー損傷の可能性をリアルタイムで評価できます。

3 EIS の影響: 使用事例 3 例

データと市場の要件に基づいた EIS の 3 つの使用事例を見てみましょう。

3.1 熱暴走検出

熱暴走は、セルやバッテリーパックの致命的な故障であり、人命を危機にさらす状態につながったり、重大な二次被害を引き起こしたりする恐れがあります。図 3-1 に、EV バッテリーパック内の複数のセルを示します。



図 3-1. EV バッテリーパック内のリチウムセル

以前の世代の BMS では、応答が低速な温度センサが採用されていましたが、通常は複数のセルがすでに熱暴走に入っていた場合にのみ検出できるようになっていました。現在市場にあるほとんどの BMS 設計では、火災が発生するわずか数分前に発火する可能性があるセルの気泡を検出する、高価な圧力センサおよびガスセンサが追加されています。個々のセルレベルにおいては、どちらのアプローチも失敗します。

EIS は、各セルのコア温度とインピーダンスの変化を検出します。EIS は、電気インピーダンス測定に基づいてセルのコア温度を監視することにより、熱暴走の初期段階にフラグを立てられます。これは、従来の温度センサでは不可能だった手法です。

さらに、EIS はバッテリーの異常や不規則性を検出します。熱暴走の主な原因の 1 つは、樹状突起の成長、またはアノード上のリチウムの蓄積であり、セル内部の短絡を引き起こします (図 3-2)。各セルのインピーダンスを監視することにより、時間の経過とともに徐々に発生する問題を個別のセルで監視できます。このセルレベルの可視性は、GB 38031-2025 で求められる 2 時間の警告時間を直接サポートします。

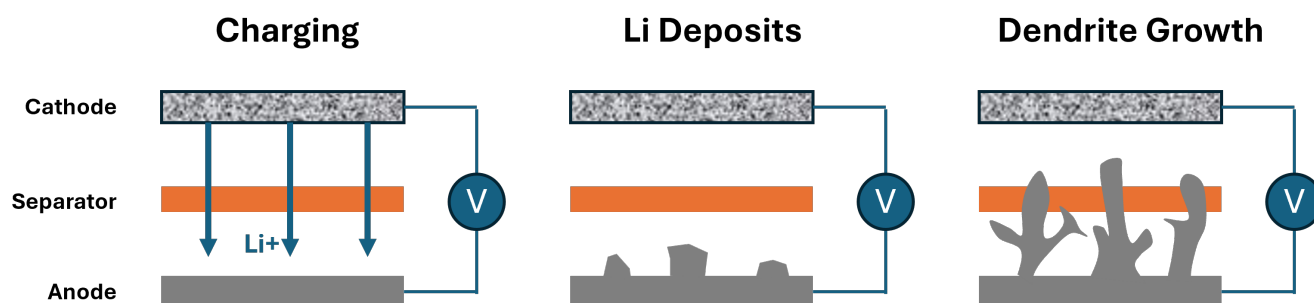


図 3-2. デンドライトの成長は熱暴走を引き起こします。

3.2 急速充電

EV 充電に関する問題は EV が本来持つ多くの利点を覆い隠しています。これは、消費者が充電による待ち時間を避けたいと考えているためです。EV バッテリーへの充電に比べてガソリン タンクを満タンにするほうが便利であることから、業界はより高速な充電機能の実現を目指すようになっており、それは当然の流れです。

外出中や旅行中に、消費者は急速充電を必要とします。トラックやバスなどの商用車は常に稼働し続ける必要があるため、必然的に急速充電に頼らざるを得ません。

残念ながら、頻繁に急速充電を行うと、バッテリーの経年劣化が加速し、バッテリー パックの寿命が 10% ~ 20% 短くなる可能性があります。大電流の充電にはバッテリー部品にストレスがかかり、リチウム メッキという不可逆的な状態になる可能性があります。リチウム メッキは、リチウムの拡散が不十分なためにアノード上にリチウムが蓄積したものであり、セルは追加の電子を受け入れる準備ができていないことを意味します。メッキ開始時の温度、充電レベル、薄 SEI 層の経年劣化はすべて、影響の原因になります。これらのストレスとセルのリチウム拡散が、デバイス メーカーがバッテリーを 100% まで充電しないことを推奨する理由です。

EIS を使用すると、次の 2 つの方法で急速充電を管理できます。

- **温度監視機能。**急速充電中に、環境とコア バッテリーの温度を許容範囲内に維持できます。温度が低いと拡散が制限され、急速充電ではバッテリーの温度が上昇する可能性があるため、継続的な監視が不可欠です。
- **拡散モニタリング。**拡散領域 (ナイキスト プロットの尾部) の情報をリアルタイムで提供します。例えば、インピーダンスが過度に大きい場合、充電電流を低減する必要があります。

リチウムの拡散を監視すると、バッテリーの経年劣化に関する警告を得られます。これらの監視により、システム設計者は充電電流を増やせます。追加の組み込みマージンを必要とし、事実上の最大電荷速度を制限する、静的でモデル化されたリチウム拡散のパラメータに頼らずに、直接測定により、電流を低減するタイミングをシステムに通知します。低インピーダンスを維持すると、充電をさらに高速化できます。

TI の BQ79826Z-Q1 が搭載している EIS エンジン、0.01Hz 以下の超低周波検出により拡散センシングを実現し、最大 5 つのインピーダンス周波数を同時に励起することにより測定時間を短縮できます (図 3-3)。

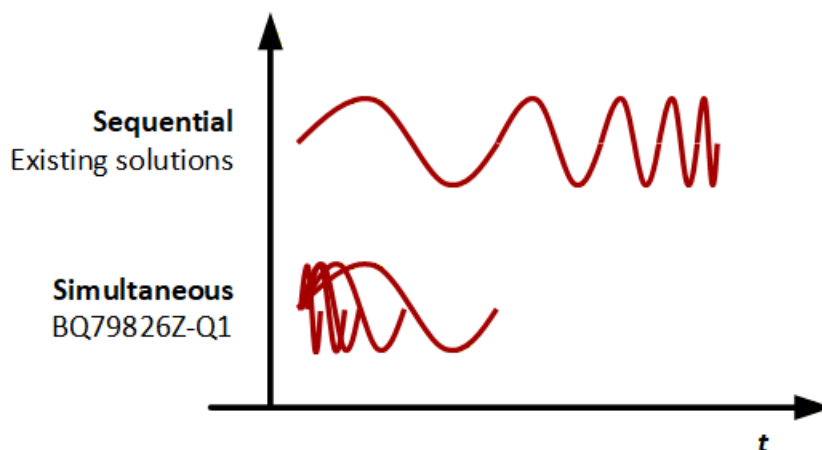


図 3-3. 同時周波数を使って測定時間を短縮

3.3 料金と利用可能状況

バッテリーの充電状態と正常性の状態は、各バッテリーシステムにとって重要なパラメータです。EIS は従来の DC 電圧測定に代わるものではありませんが、有意義なデータの可用性を高めて意思決定を行い、既存のシステムを改善するための 2 つの方法があります。

- **DC 電圧精度:** LFP セルは、電圧と充電状態に対する曲線が 30% ~ 90% の範囲で非常に平坦であることを示しています (図 3-4 を参照)。従来の開路電圧の測定は不正確になっています。EIS は、充電状態の直接測定を可能にして精度を向上させ、ワーストケースの誤差を 5% ~ 10% から 2% 未満に低減して、バッテリーの有効活用領域を拡大することができます。
- **アイドル時のバッテリー正常性の検出:** 多くの ESS システムは長時間アイドル状態のままであるため、必要なときにセルが充電を供給できるかどうかを把握することは困難です。残念ながら、DC 電圧だけではリチウムの拡散やインピーダンスを測定することはできません。EIS を使用すると、システム設計者はバッテリーの状態を定期的にチェックし、必要な時にシステムが電力を供給できる状態であることを確認できます。

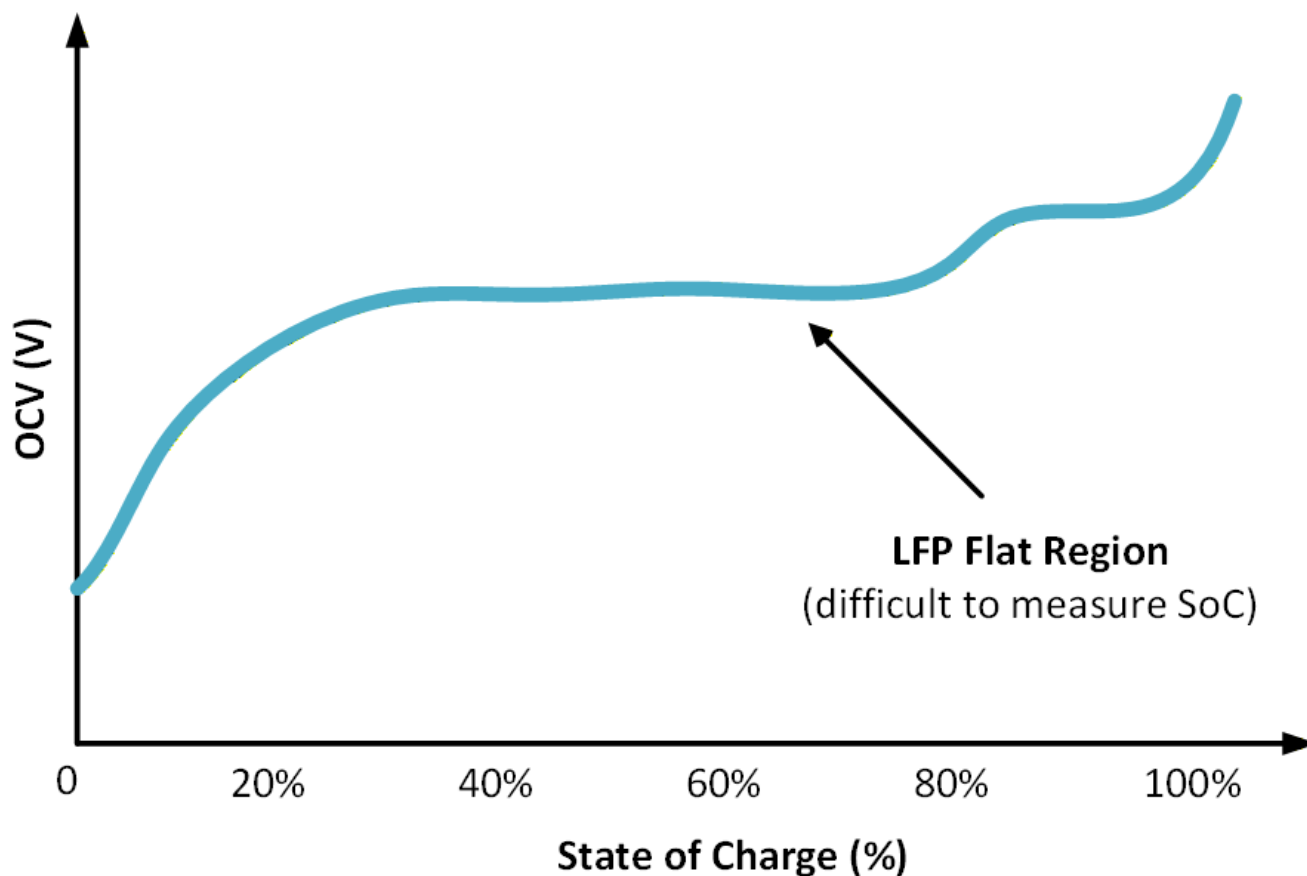


図 3-4. LFP の開路電圧と、フラット領域を示す充電状態曲線との関係

EIS は、従来の BMS 方式が複雑であるか測定できない場合に、追加の情報を提示し、充電状態をより正確に取得して、電力の可用性を維持できます。

4 EIS の測定

4.1 EIS システム アーキテクチャ

EIS 対応 BMS は、電圧センシング用の複数のスタック バッテリ モニタと電流センシング用のパック モニタを含む従来型のアーキテクチャをベースにしており、さらに、次の 2 つのコンポーネントが含まれます (図 4-1)。

- **電流励起ソース。** 正弦波、方形波、その他の成形された波形を生成してセルを励起します。
- **電圧と電流の同期サンプリング。** 電流測定デバイスと電圧測定デバイス間で発振器を同期させ、インピーダンス位相誤差を低減します。

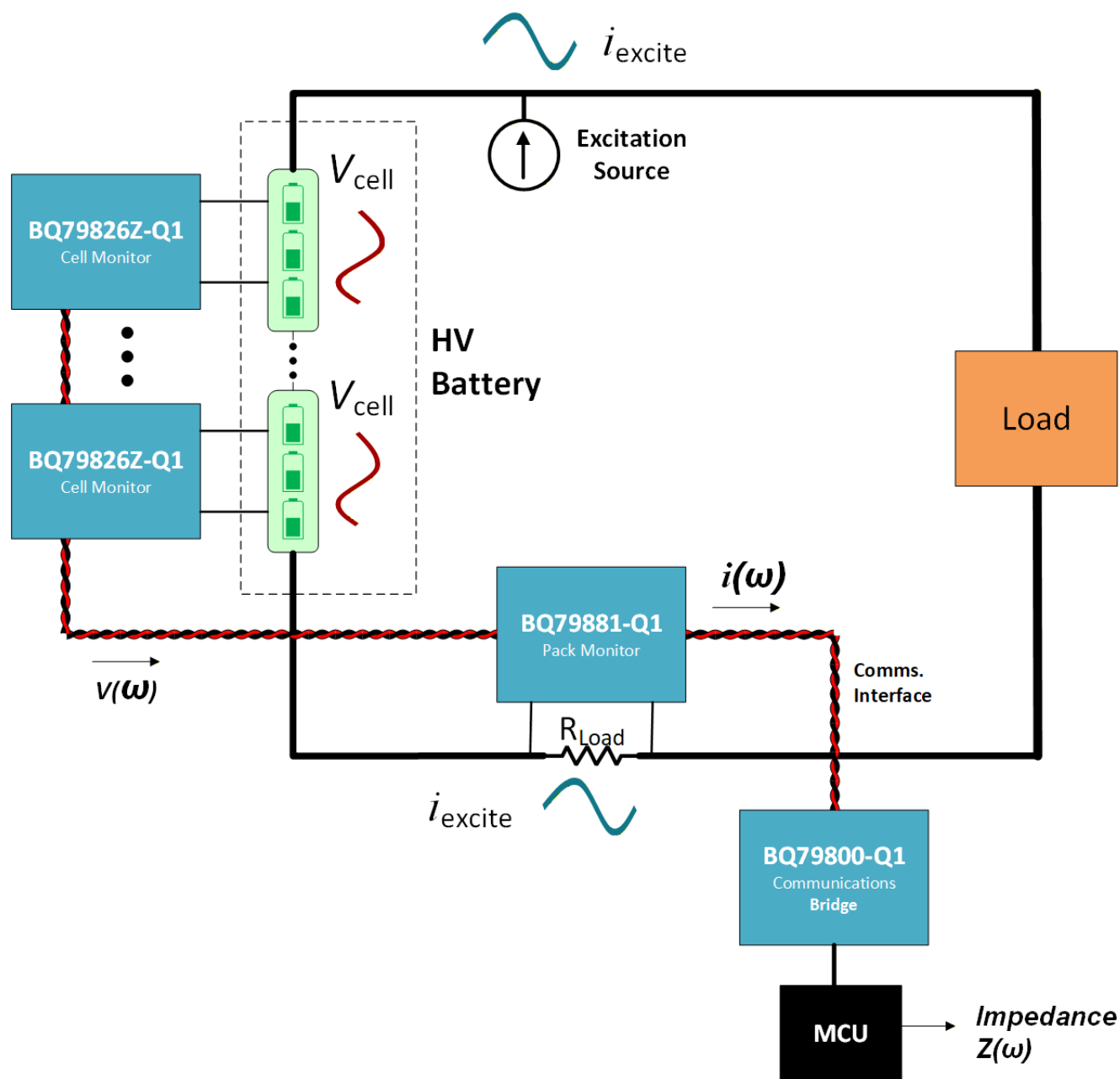


図 4-1. パック EIS システム ブロック図

図 4-1 に、BQ79826Z-Q1 セル電圧モニタ 2 個と、電流用の BQ79881-Q1 パック モニタを 1 個含む、代表的なバッテリーパック構成を示します。BQ798xx モニタは、電流と電圧の測定を緊密に整合させる同期プロトコルを内蔵しており、インピーダンスの位相誤差を最小化します。励起ソースは、BQ798xx デバイスを使用して直接制御することも、DC/DC コンバータ、チャージャ、バランサ、プリチャージ回路、インバータなどの最終機器内にある既存の電力源をソースにすることもできます。

4.2 EIS 測定のパラメータ

EIS システムを最適化するには、次の 3 つの電気設計パラメータに注意する必要があります。

- **セルのインピーダンス:** バッテリーの動作時間全体にわたり、幅広いインピーダンスがあります。設計者はそれらをナイキストプロットで把握できます。インピーダンスは、セルの励起に必要な電流の量を直接決定します。例えば、100Ah のセルは通常、 $500\mu\Omega \sim 750\mu\Omega$ のインピーダンスを示しており、A/D コンバータ (ADC) を測定するために 1AP ~ 2AP のピークが必要になる場合があります。

- **励起電流振幅**: 電流振幅は、バッテリーの直線性要件と ADC の最適な測定範囲に影響を及ぼします。直線性により、正弦波で励起したときにバッテリーが正弦波で応答することが保証されます。目標は、電流励起振幅をできるだけ小さくし、消費電力を制限することです。
- **ADC ノイズ**: 電圧信号と電流信号はマイクロボルトの範囲内にある可能性があるため、高い信号対雑音比 (SNR) を実現するには、ADC 入力換算ノイズが不可欠です。低ノイズの ADC を選択することにより、SNR が向上し、必要な励起電流が減少します。

4.3 TI の EIS チップセット

BQ79826Z-Q1 および BQ79881-Q1 バッテリー モニタを採用すると、TI の統合型 EIS エンジンを使用してすべてのセルのインピーダンスを測定できます。0.01Hz までのあらゆる EIS 周波数帯域でインピーダンスをキャプチャすることが可能であり、温度、充電状態、熱暴走にリンクした微細なインピーダンスを検出できます。

BQ798xx チップセットを組み合わせると (図 4-2 を参照)、完全な BMS を形成し、幅広いバッテリー セル構成に対応するスタックابلな 26 チャンネル バッテリー モニタと、電流とバック電圧を測定する高精度パック モニタが備わります。

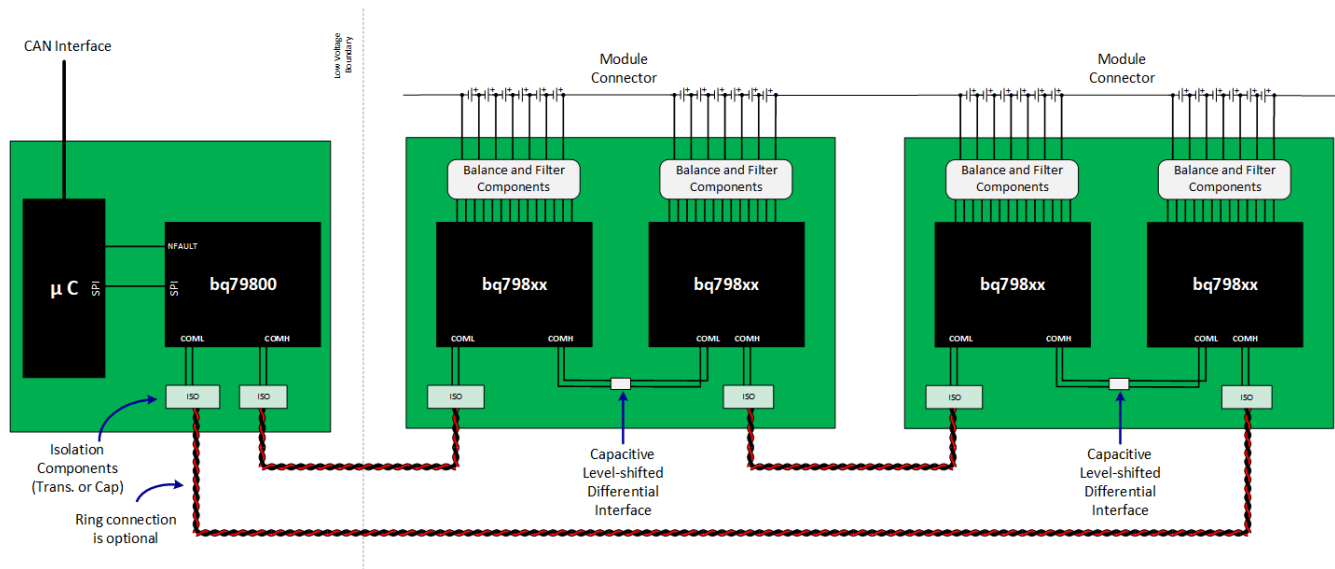


図 4-2. BQ798xx BMS のブロック図

EIS 向けに最適化された設計により、これらのデバイスはバッテリー容量の増大に関する厳しい要件に対応し、超小型インピーダンスの測定を可能にします。電圧および電流センシング用の超低ノイズ ADC により SNR が向上します。0.01Hz ~ 3.5kHz の広い周波数範囲に対応しているため、バイタル インピーダンス領域をカバーできます。スタック同期により電流および電圧測定間の時間が最小化されるため、位相誤差が低減されます。

4.4 リファレンス デザイン

BQ79826Z-Q1 と BQ79881-Q1 を使用して EIS を迅速に評価できるように、TI はハードウェア、ソフトウェア、システムレベルのサポートを搭載した、各種リファレンス デザインを提供しています。設計者は、評価基板をバッテリー セル、モジュール、またはパックに直接接続する方法で、標準的な BQ79826 および BQ79881 評価基板を使用してほとんどの EIS 評価を実施できます。TI はまた、EIS の性能テスト、アルゴリズム開発のためのデータ収集、および車内統合向けのソフトウェア ソリューションも提供しています。また、TI の EV BMS 3.0 リファレンス デザインなど、複数のリファレンス デザインは、BMS システムおよび EIS システムの計画、テスト、開発期間の短縮に役立ちます。

リクエスト ベースで TI が提供するその他のリファレンス デザイン:

- 52 ~ 104 個の直列セル ESS システム: ESS システム向けパックまたはラックのリファレンス デザインです。
- スタック型アクティブ ブリッジ: 99% を上回る効率を達成する EIS 励起ソース (特許申請中)。
- アクティブ パック バランシング: 既存のパック バランシング回路を使用してセルを励起する、デュアル アクティブ ブリッジトポロジに基づく励起ソース。

5 まとめ

EV、エネルギー ストレージ、産業用ロボットなどが使用するバッテリーの安全性、信頼性、寿命延長に対するニーズが高まっている現状は、**BMS** システムの設計および製作の方法、システムで何が実現できるかに影響を及ぼしています。**EIS** を採用すると、**BMS** システムはスマート化が進み、温度スパイクの高速検出、充電状態の推定精度の向上、セル劣化の早期警告を実現できます。このような詳細情報は、バッテリー寿命の延長、充電速度の向上、安全性の向上に役立ちます。

EIS エンジン内蔵した **TI** の次世代チップセットは、これらの能力を向上し、業界の将来の電動化目標を達成するのに役立ちます。

著者について

Brian Burk は、テキサス インストルメンツのバッテリー管理ソリューション チームのシステム エンジニアです。**2009** 年に **TI** に入社して以来、オーディオ **DSP**、アンプ、モーター駆動制御、パワー エレクトロニクス、バッテリー管理システムの、研究開発や製品管理を率いてきました。同氏は、車載 **BMS** 製品ラインのプロダクト マネージャ兼システム エンジニアとして、電気化学インピーダンス分光法をはじめとする技術革新を牽引しています。こうした取り組みにより、**TI** の製品は自動車、産業機器、コンシューマ エレクトロニクスの各分野において、常に市場の最前線に位置づけられています。また、これまでに **10** 件以上の特許取得につながる先進的なソリューション開発を主導してきました。**Burk** はテキサス大学オースティン校で電気工学の理学士号を取得し、**TI** の技術リーダーシップ委員会に所属しています。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含みいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、TI は一切の責任を拒否します。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月