

Application Note

バッテリー残量測定アルゴリズムの比較



Nick Richards

概要

このアプリケーション ノートでは、電圧相関、電圧 + IR 補正、クーロン カウント、CEDV、Impedance Track など、バッテリーの残量測定に使用するさまざまなアルゴリズムについて検討および比較します。

目次

| | |
|------------------------|----|
| 1 概要..... | 2 |
| 2 電圧相関..... | 2 |
| 3 電圧 + IR 補正..... | 2 |
| 4 クーロン カウント..... | 3 |
| 5 CEDV..... | 4 |
| 6 Impedance Track..... | 5 |
| 7 アルゴリズムの比較..... | 7 |
| 7.1 SOC 誤差の計算..... | 7 |
| 7.2 SOC 誤差の比較..... | 8 |
| 8 まとめ..... | 10 |
| 9 参考資料..... | 10 |

図の一覧

| | |
|--|----|
| 図 2-1. OCV ルックアップ テーブルとグラフ..... | 2 |
| 図 3-1. 電圧 + IR 降下グラフ..... | 2 |
| 図 4-1. 低温の容量への影響..... | 3 |
| 図 5-1. CEDV のパラメータ..... | 4 |
| 図 5-2. EDV スレッシュホールド..... | 4 |
| 図 6-1. Impedance Track モード変更の例..... | 5 |
| 図 6-2. Q_{max} 測定の例..... | 6 |
| 図 7-1. テスト 1 の電圧および電流プロファイル..... | 7 |
| 図 7-2. テスト 2 の電圧および電流プロファイル..... | 7 |
| 図 7-3. テスト 1 とテスト 2 の電圧相関 SOC 誤差..... | 9 |
| 図 7-4. テスト 1 と 2 の電圧 + IR 補正 SOC 誤差..... | 9 |
| 図 7-5. テスト 1 とテスト 2 のクーロン カウント SOC 誤差..... | 9 |
| 図 7-6. テスト 1 と 2 の Impedance Track SOC 誤差..... | 10 |

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

バッテリーの充電状態を推定することは困難であり、精度誤差を最小限に抑えてこれを実現するために、多様な種類のアルゴリズムが使用されてきました。現在使用されている最も一般的なアルゴリズムには、電圧相関、電圧 + IR 相関、クーロンカウントなどがあります。これらの汎用的な残量測定アルゴリズムを、TI の Impedance Track アルゴリズムと比較することで、最も精度の高いバッテリー残量測定が Impedance Track に搭載されている理由がわかります。

2 電圧相関

電圧相関は、非常に基本的なバッテリー残量測定の手段です。このアルゴリズムは、バッテリーの OCV (開回路電圧) を取得し、その値を電圧のルックアップテーブルと照合します。このテーブルでは、各電圧値がそれぞれ異なる SOC (充電状態) に対応しています。

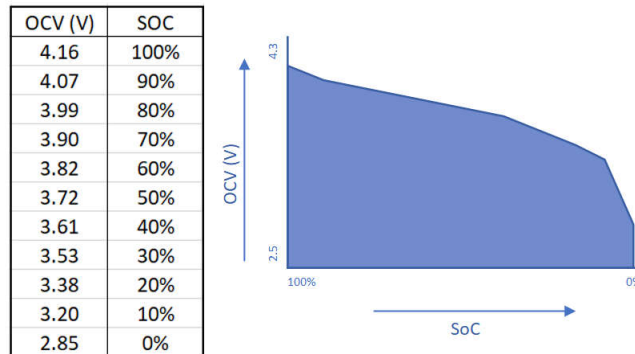


図 2-1. OCV ルックアップ テーブルとグラフ

例として、図 2-1 に、リチウム イオン バッテリーの電圧ルックアップ テーブルを示します。電圧相関法を使用すると、バッテリーの OCV が 3.72V の場合、その時間における SOC が 50% であるとゲージは予測できます。

電圧相関は非常に簡単な実装方法ですが、相関には多くの欠点があります。電圧相関は SOC を報告するだけであり、SoH (健全性状態)、残量、残りの実行時間などの他の重要なデータを報告することはできません。また、放電速度、温度、バッテリー寿命などの重要な要因に応じて SOC を調整することもできません。

こうした要因から、バッテリーの休止期間が長く、その間に OCV を測定して SOC を正確に特定できるアプリケーション、あるいは電流値が十分に低く、OCV による測定精度が維持されるアプリケーションにおいては、電圧相関法を用いることを推奨します。

3 電圧 + IR 補正

電圧 + IR 補正では、バッテリーに負荷がかかったときに発生する IR 電圧降下を考慮して、電圧相関を拡張します。IR 降下の大きさは、バッテリーの内部インピーダンス、負荷電流の量、バッテリーの温度に依存します。

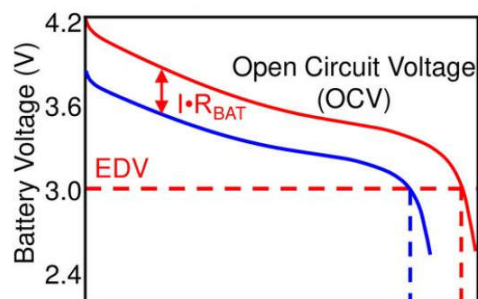


図 3-1. 電圧 + IR 降下グラフ

電圧 + IR 補正の欠点は、経年劣化したセルを測定する場合や、バッテリーが低温環境に曝された場合に、内部インピーダンスが増大するため、測定誤差が大きくなる可能性がある点です。しかし、電圧 + IR 補正により、電圧相関の欠点がいくつか改善されます。SOC は、放電終了までの放電速度と温度に合わせて調整することができます。

4 クーロン カウント

クーロン カウントは、バッテリーから出ている電荷量またはバッテリーに流入している電荷量を直接測定するものです。式 1 はクーロン カウントに使用されます。この場合、現在の充電量は開始充電量に時間の積分を加えた値に等しくなります。

$$q(t) = q_0 + \int (I(t) \times dt) \tag{1}$$

クーロン カウント方式の主な問題は、バッテリーの充電開始量を知る必要があることです。そのため、SOC を初期化するにはフル充電が必要です。そうでない場合、SOC は不明です。クーロン カウント方式の欠点は、正確な SOC を報告するためにフル充電容量が必要となる点にあります。そして、このフル充電容量を算出するには完全放電 (空になるまでの放電) が求められますが、システムシャットダウン時のデータ損失を招くため、大半の用途においては現実的な手法とは言えません。クーロン カウントにおけるもう 1 つの問題として、バッテリーが極端な温度変化にさらされた場合、SOC が不正確に報告される可能性がある点が挙げられます。たとえば、室温でバッテリーを充電した場合、クーロン カウントを使用して 2250mAh のフル充電容量を計算できます。バッテリーが極めて低温の環境下で使用された場合、低温によって開放回路電圧における IR 降下が拡大するという影響によって、使用可能な合計容量は 1100mAh まで低下する可能性があります。これは、室温時と低温時における満充電容量の間に約 51% の差が生じていることを意味します。その結果、クーロン カウントによる残量表示が、実際にバッテリーに残っている充電量よりも過大に報告されることになります。

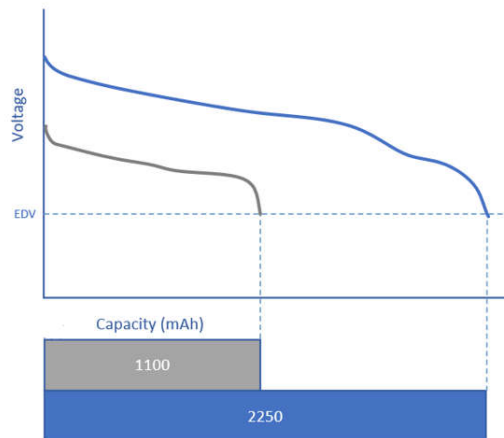


図 4-1. 低温の容量への影響

5 CEDV

CEDV は、残量測定のバックボーンとしてクーロン カウントを使用するアルゴリズムです。CEDV アルゴリズムは、バッテリーの SOC、温度、電流の関数としてセル電圧を数学的にモデル化します。バッテリー電圧モデルを使用してフル充電容量 (FCC) のキャリブレーションを行い、補償バッテリー電圧を放電終了アラームや、ゲージが 0% SOC を報告した場合に使用します。このアルゴリズムでは、バッテリーごとに異なる特定のパラメータを使用し、GPCCEDV ツールを使用してこれらのパラメータを収集できます。

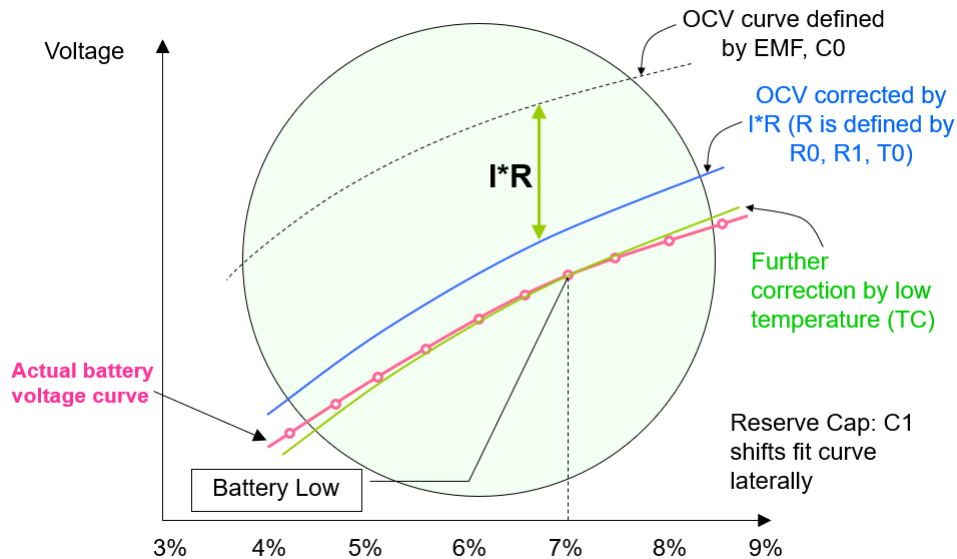


図 5-1. CEDV のパラメータ

図 5-1 は、CEDV のパラメータを視覚的に表したものです。パラメータ EMF および $C0$ は、関数 OCV (SoC, T) を定義します。パラメータ $R0$, $R1$, $T0$ は R (SoC, T) を定義します。 $R1$ は、 R (SoC) 依存性のスロープを定義します。 $R0$ は R の大きさを定義します。 $T0$ は R (T) 依存性の勾配を定義します。

ゲージは、完全に放電する前に確認する必要があります。そのため、残量に対する所定のパーセンテージに対応する電圧スレッシュホールドがゲージに設定されています。これらのパラメータは EDV2、EDV1、EDV0 で、通常はそれぞれ 7%、3%、0% に設定されます。これらのパラメータは、SOC ポイント間の電圧の差が大きくなるため、バッテリーの放電終了向けに設定されます。これにより、電圧読み取り値の誤差が最小限に抑えられ、SOC 計算の誤差が最小限に抑えられます。最後に、温度と放電速度の変化後の新しい FCC の学習は、EDV2 ポイントでのみ行われます。したがって、放電が終了する前に突然の SOC 降下が発生する可能性があります。温度が低く放電速度が高い場合、最大 50% に及ぶ場合があります。

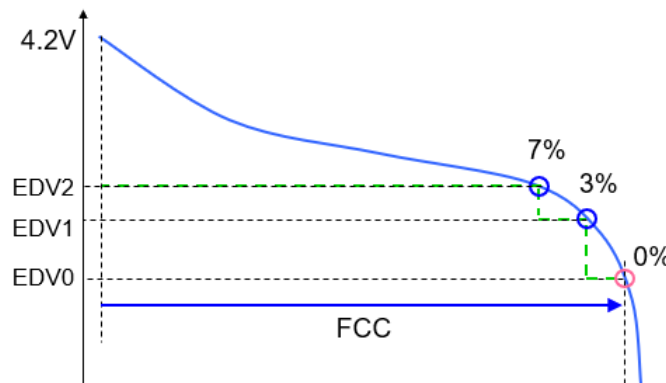


図 5-2. EDV スレッシュホールド

CEDV は、電圧 + IR 補正アルゴリズムの残量測定精度を向上させます。CEDV では、電圧を読み取り、これをデバイスリセット時の 10 ポイント電圧テーブルに関連付けることで、バッテリーの初期容量を推定することでクーロン カウントを改善します。問題点としては、自己放電が精度に影響を及ぼす可能性があること、および SoH と SOC の正確な推定に必要な FCC を学習するためにバッテリーの完全放電が必要であることが挙げられます。

CEDV は残りの実行時間を報告できます。CEDV は放電終了時に SoH と残量を報告することもでき、放電終了時に放電速度と温度に合わせて SOC を調整することもできます。しかし、電圧 + IR 補正とは異なり、CEDV は残量をワット時単位で報告することはできません。CEDV の欠点は、バッテリーの経年劣化によりバッテリーの内部インピーダンスが過小評価される可能性があることです。その結果、フル充電容量と経年劣化したバッテリーの SOC に 15% ~ 25% の誤差が発生する可能性があります。

6 Impedance Track

Impedance Track では、クーロン カウントと電圧 + IR 補正の要素を組み合わせることで、前述のアルゴリズムを大幅に拡張しています。Impedance Track は、次のようなさまざまな要因を使用して SOC を計算します。放電深度 (DOD)、合計化学容量 (Q_{max})、内部バッテリー抵抗は DOD、電流負荷、温度に依存します。

まず、Impedance Track で、バッテリーが現在充電中、放電中、緩和状態かを判定します。次の 3 つの異なる状態を区別するには、ゲージに特定のパラメータを設定する必要があります。Chg 電流スレッショルド、Dsg 電流スレッショルド、終了電流、Chg 緩和時間、Dsg 緩和時間。

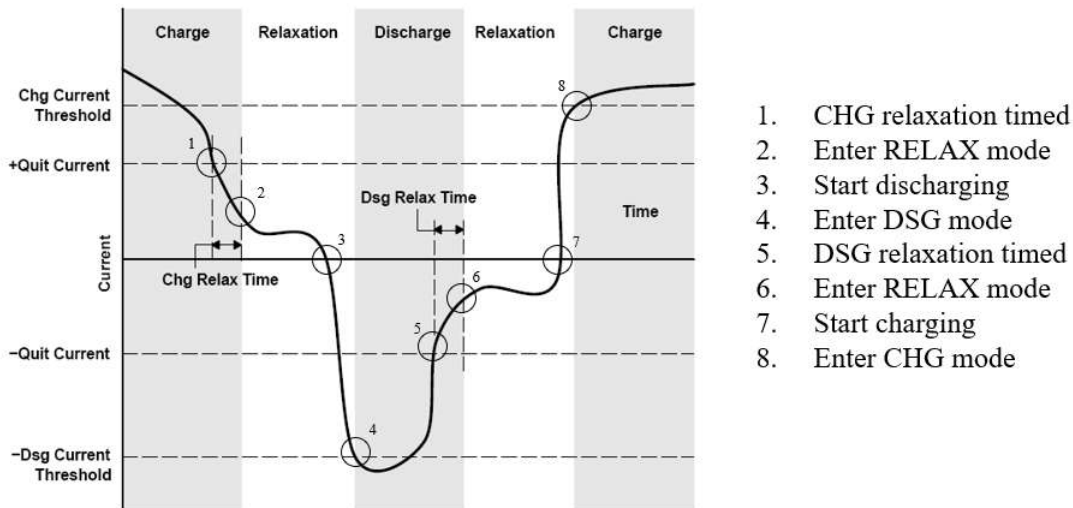
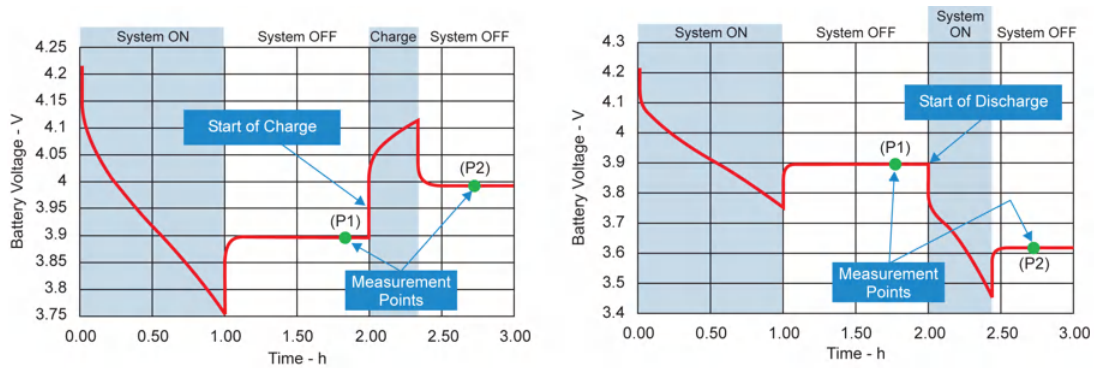


図 6-1. Impedance Track モード変更の例

ゲージは、バッテリーが緩和状態のときの OCV の読み取り値に基づいて、化学的放電深度 (DOD_0) を更新します。DOD を求めるには、現在の OCV と温度を、事前定義済み DOD (OCV, T) テーブルと関連させます。このテーブルは各バッテリーのさまざまな化学物質に固有であり、ケミストリー ID によって区別されています。OCV 読み取り値は、電圧変化率が毎秒 4 マイクロボルト未満のときに発生します。OCV 読み取り時の電流が 0 でない場合、IR 補正が行われます。

図 6-2 に示されているように、ゲージは、充電または放電の前後に行われる 2 つの DOD 読み取り値の間で Q_{max} を更新できます。 Q_{max} を更新するには、バッテリーの設計容量に基づいて充電が 37% 以上変化する必要があります。ゲージが最初の Q_{max} を更新している場合、充電の 90% 以上の変化が必要です。クーロン カウントを使用して充電の変化を判定します。式 2 に、 Q_{max} の計算方法を示します。

$$Q_{max} = \frac{\Delta \text{charge}}{SOC_1 - SOC_2} \quad (2)$$


 図 6-2. Q_{max} 測定の場合

このゲージは、バッテリーの放電中に、バッテリーの内部抵抗テーブル (R_a テーブル) を更新することができます。内部抵抗は、OCV (DOD, T) テーブルから対応する DOD ポイントにおける電圧値を求め、現在の負荷時電圧との差分を算出した上で、これを実測電流値で除することにより算出されます。式 3 に、内部抵抗の計算方法を示します。

$$\text{Internal Resistance} = \frac{\text{OCV}(\text{DoD}, T) - \text{Present Loaded Voltage}}{\text{Measured Current}} \quad (3)$$

このアルゴリズムは、上記のすべての情報を使用して、ユーザーがプログラムした負荷選択に基づいてシミュレーションを実行し、SOC を計算します。このシミュレーションでは、通過電荷に基づいて残量 (RemCap) が毎秒 1 回計算され、FCC は特定の状況で更新されます。FCC は、抵抗グリッドポイントの更新中、緩和中、充電または放電の開始中に更新できます。

Impedance Track は、これまでに述べたアルゴリズムに比べて多くの改善を実現しています。まず、SOC を初期化するためにフル充電が必要なクーロンカウント / CEDV とは異なり、SOC を初期化するために Impedance Track を完全に充電する必要はありません。自己放電は、OCV 読み取り値によって多く補償されるため、長時間アイドル状態になっても SOC の精度が高い状態を維持できます。バッテリーの内部抵抗は継続的に更新されるため、経年劣化したセルについては残量測定誤差が小さくなり、放電が高い場合にも誤差が増加しません。温度補償された抵抗の更新により、内部バッテリーインピーダンスが高い温度での残量測定精度が向上します。Impedance Track は常にシミュレーションを再実行するため、放電中の重要なポイントでフル充電容量 (mAh と Wh で報告) が更新されます。また、 Q_{max} および R_a テーブルが常に更新されるため、SoH は継続的に更新されます。SOC は、バッテリーの放電全体を通じて、放電速度と温度に合わせて調整することができます。

7 アルゴリズムの比較

この比較のために、ロボット掃除機を使用して、通常動作時に電圧と電流のデータを収集しました。テスト環境では、4S2P バッテリーを使用して室温で掃除機をかけ、モップ掛けを行っています。2つのテストを実施し、2つの異なる負荷プロファイルを示しました。最初のテストでは、ロボットによって低パイルカーペットに掃除機をかけています。図 7-1 に、テストの電圧および電流プロファイルを示します。

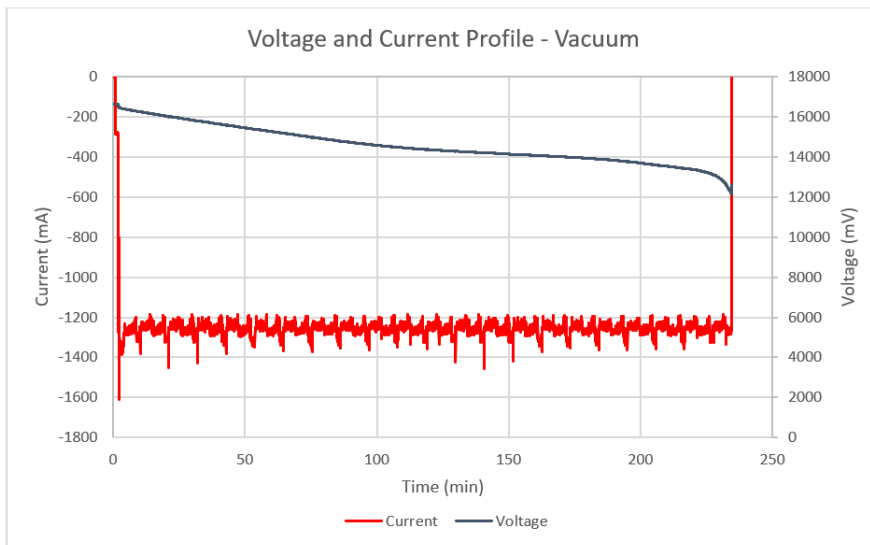


図 7-1. テスト 1 の電圧および電流プロファイル

2 番目のテストでは、ロボットによってタイルフロアをモップ掛けしています。ロボットはベースに戻ってモップを再度濡らし、バッテリーを短時間充電できます。図 7-2 に、このテストの電圧および電流プロファイルを示します。

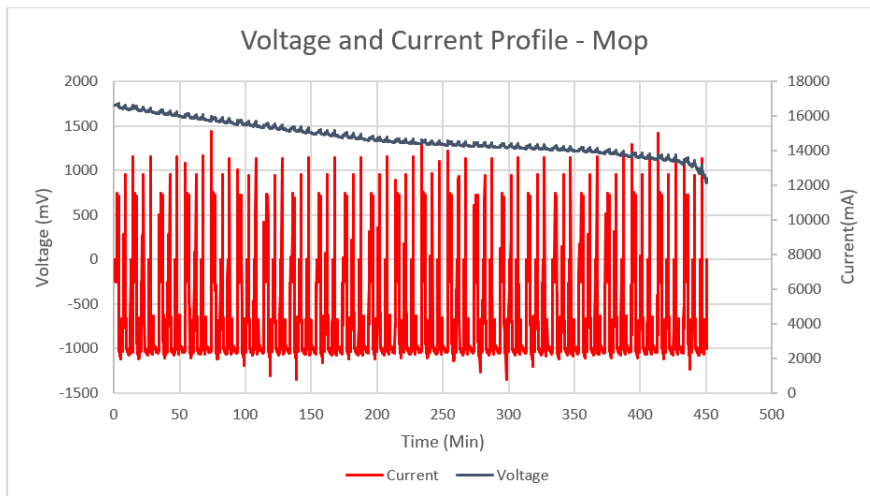


図 7-2. テスト 2 の電圧および電流プロファイル

7.1 SOC 誤差の計算

説明するさまざまなアルゴリズムを比較するには、SOC 誤差を使用できます。SOC 誤差は、残量測定アルゴリズムの精度に直接反映しています。SOC 誤差が小さいほど、より正確な計測アルゴリズムが得られ、その逆も同様です。SOC 誤差は、真の SOC と計算された SOC との差を取ることで求められます。このテストには TI のインピーダンストラックゲージが使用されているため、Impedance Track アルゴリズムについて計算された SOC は、収集されたデータ内で報告され

ています。しかし、この場合は、電圧相関、電圧 + IR 補正、クーロン カウント アルゴリズムについて計算した SOC、および真の SOC を計算する必要があることを意味します。

7.1.1 真の SOC の計算

最初のステップは、式 4 を使用して、2 つのサンプル ポイント間の通過電荷 (dQ) を計算することです。通過電荷は、前に通過した電荷のローリング合計です。dQ は時間単位で正規化されるため、データが秒単位で報告される場合は、経過時間を 3600 で除算して時間単位に変換する必要があります。

$$dQ_N = \frac{(ElapsedTime_{N+1} - ElapsedTime_N) \times Current}{3600} + dQ_{N-1} \quad (4)$$

次に、バッテリーの真のフル充電容量を計算します。これは、通過電荷の合計です。その後、式 5 を使用して、各サンプルポイントについて残量を計算できます。

$$CalculatedRemainingCapacity = CalculatedFCC - dQ \quad (5)$$

最後に、式 6 を使用して、各サンプル ポイントで真の SOC を求めることができます。

$$TrueSOC = \frac{CalculatedRemainingCapacity}{TrueFCC} \times 100 \quad (6)$$

7.1.2 電圧相関と電圧 + IR 補正の SOC 計算値の求め方

電圧相関と電圧 + IR の補正には、11 ポイントの OCV テーブルを使用しています。SOC が 10% 刻みで報告される代わりに、リニア補間を使用して、より正確な SOC が報告されています。

電圧 + IR 補正では、緩和期間後の最初の放電からバッテリーの内部抵抗を計算しています。内部抵抗を計算すると、放電中に測定された電圧は式 7 を使用して正規化されます。

$$Normalized\ Voltage = Measured\ Voltage + |Measured\ Current * Internal\ Resistance| \quad (7)$$

7.1.3 クーロン カウントの SOC 計算値の求め方

この比較の目的で、クーロン カウント アルゴリズムは、最良のシナリオを示すために、バッテリーがフル充電で開始されたと想定しています。クーロン カウントの SOC 計算には、式 8 を使用しています。

$$SOC_N = \left(1 - \left| \frac{\sum_0^N dQ}{DesignCapacity} \right| \right) \times 100 \quad (8)$$

設計容量は、バッテリーのデータシートに記載されている容量です。

7.2 SOC 誤差の比較

電圧相関のピーク誤差は、テスト 1 で約 20%、テスト 2 で約 17% です。電圧 + IR 補正のピーク誤差は、テスト 1 で約 11%、テスト 2 で 10% です。クーロン カウントのピーク誤差は、FCC が学習されていないと仮定して、テスト 1 と 2 の両方で約 6% です。以降のサイクルでは、温度と負荷が同様であると仮定すると、クーロン カウント誤差が小さくなる可能性があります。Impedance Track のピーク誤差は、テスト 1 とテスト 2 の両方で約 1% です。

CEDV の精度はクーロン カウンタの誤差と非常に似ているため、これらの負荷プロファイルの例のグラフ比較には CEDV は表示されません。

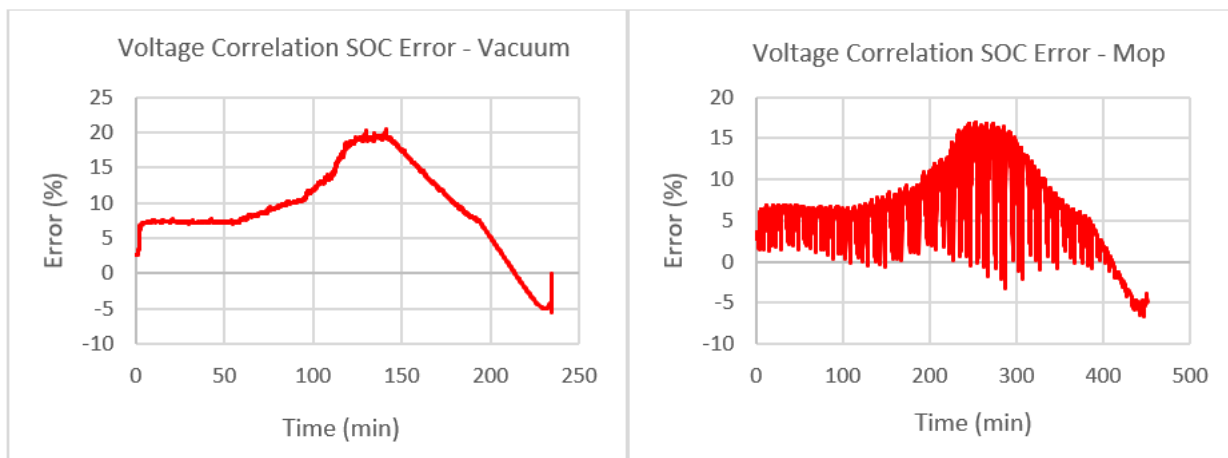


図 7-3. テスト 1 とテスト 2 の電圧相関 SOC 誤差

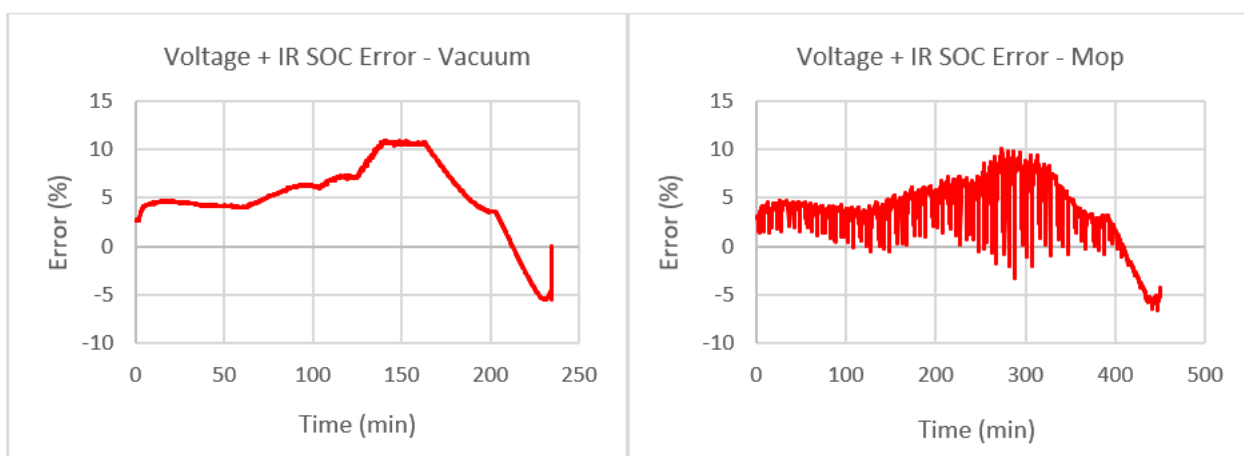


図 7-4. テスト 1 と 2 の電圧 + IR 補正 SOC 誤差

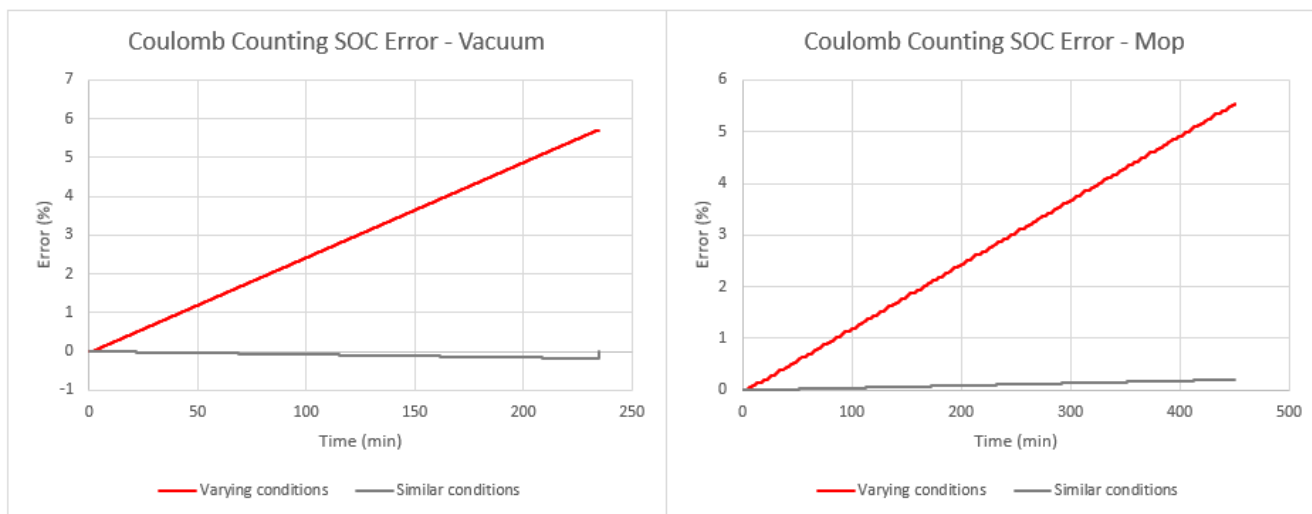


図 7-5. テスト 1 とテスト 2 のクーロン カウント SOC 誤差

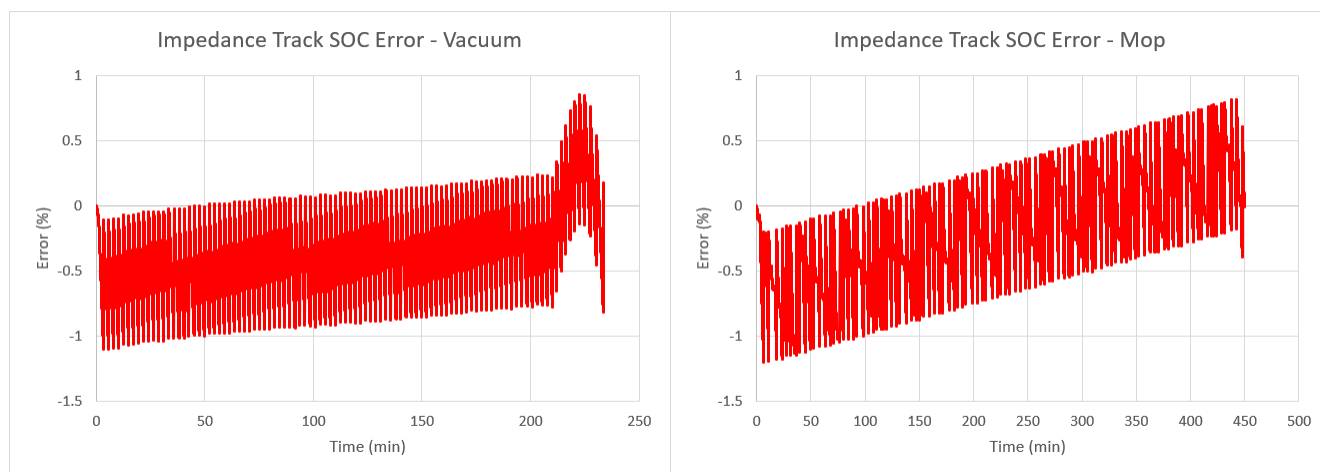


図 7-6. テスト 1 と 2 の Impedance Track SOC 誤差

8 まとめ

Impedance Track は、他の一般的に使用されるアルゴリズムと比較して、最高精度のバッテリー残量測定を実現します。電圧相関は最もシンプルな実装方法ですが、Impedance Track は最大の SOC 誤差の低減を実現します。電圧 + IR 補正を示して、電圧相関によるピーク SOC 誤差を半分に低減し、クーロン カウントによって SOC 誤差をさらに低減できることを示しています。Impedance Track は、これら 3 つのアルゴリズムをすべて使用するため、最も精度の高い測定機能となります。高精度の残量測定アルゴリズムを使用する最大の利点は、アプリケーションの実行時間を長くできることです。

9 参考資料

- テキサス インストルメンツ、『[bq2750x ファミリーにおける Impedance Track™ バッテリー残量測定アルゴリズムの理論と実装](#)』
- テキサス インストルメンツ、『[充電状態 \(SoC\) 精度の計算方法](#)』
- テキサス インストルメンツ、『[Impedance Track に関する FAQ](#)』

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むいかなる保証も、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、

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