



Application Examples

Modeling Lithium-ion Battery Chargers in PLECS®

Munadir Ahmed

PLECS®によるリチウムイオン電池充電器のモデリング

Version: 02-16

1 はじめに

リチウムイオン(Li-ion)電池は、電気自動車、コードレス電動工具、エネルギー貯蔵システムなどの電気システムで不可欠な役割を果たします。これらのシステムの設計段階では、エンジニアはPLECSなどのシミュレーション環境で、さまざまな制御方式や回路を開発、調整し、性能をベンチマークします。Li-ion電池は多くの場合、これらの回路で理想的な定電圧源としてモデリングされます。ただし、電池が充電および放電されると、電池の電流と電圧(I/V)が変化します。これらの影響は、定電圧源を備えたモデルには反映されません。システム全体の性能を最適化するには、電池の $I-V$ 特性を考慮する必要があります[1]。さらに、これらのモデルは、システムレベルでさまざまな充電および充電状態(State of Charge: SOC)推定アルゴリズムをベンチマークするために使用できます。

本稿では、2つの回路ベースLi-ionセルモデルについて説明します。またモデルの利点と欠点についても説明します。電池パックはセルモデルを使用して作成し、降圧コンバータの出力に接続します。次に、降圧コンバータの平均モデルを開発し、長所と短所を調査します。最後に、定電流定電圧(Constant Current, Constant Voltage: CCCV)充電アルゴリズムでLi-ion電池パックを充電する降圧コンバータのシミュレーション結果を示します。

2 Li-ion電池モデル

電池の電圧は、充電および放電されるたびに変化し、電池のSOCと非線形の関係を示します。したがって、電池のSOCも変化するため、電圧の変化をモデルに反映させることが重要です。

Li-ion電池モデルは、電気化学、数学、電気の3つの主要なカテゴリに分類できます。電気化学モデルは、偏微分方程式の大規模なシステムを解くことで構成されます。これらのモデルは非常に正確で、主に電池パッケージの設計時に利用されます。しかし、これらのモデルのシミュレーションは、複雑な方程式を解く必要があるため、非常に時間がかかります[2]。

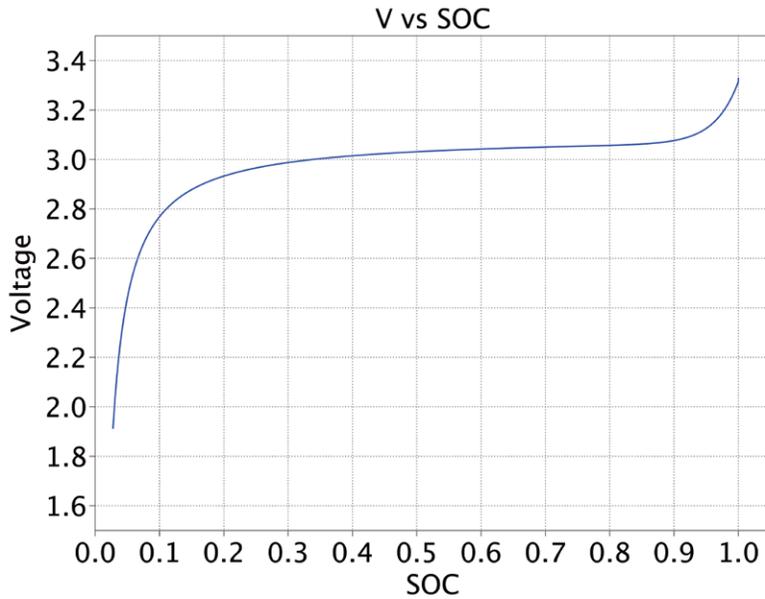
代替のモデリング方法として、実験式や確率的手法に基づくものがあります。これらの数学モデルは、電池の稼働時間、効率、容量を予測するために使用します。しかし、それらはパワーエレクトロニクスシステムの設計と最適化に不可欠な $I-V$ 特性を提供することはできません[2]。

回路ベースや電気モデルは、シミュレーション効率を維持しながら、Li-ion電池の $I-V$ 特性を正確に示すことができます。これらのモデルは、制御された電圧源に接続された抵抗器とキャパシタに基づいています。以下では、そのような2つのモデルについて説明します:

2.1 RCチェーンベースのLi-ionモデル

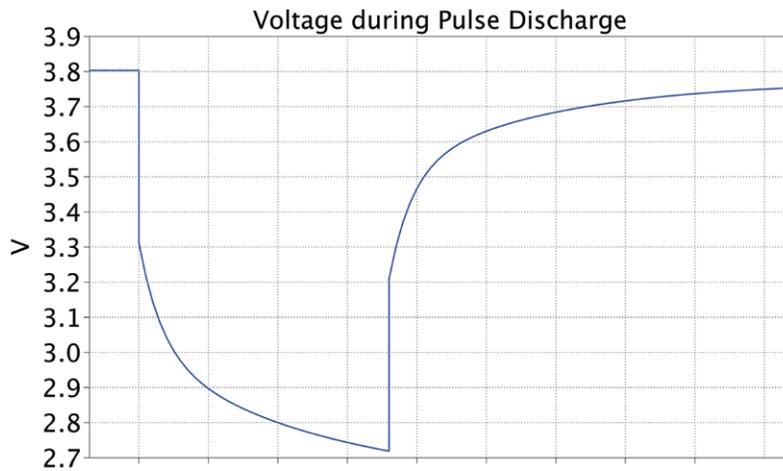
Li-ion電池のSOCの関数としての電圧は、[図1](#)のような特性を示しています。この特性は、電圧がSOCの関数として決定される制御電圧源を使用して実現できます。

図1: SOCの関数としての電圧



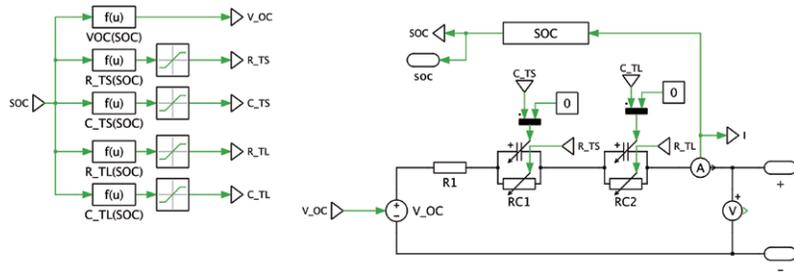
さらに研究によると、電流の負荷ステップでは、[図2](#)に示すように、電池は瞬間的な電圧降下と、遅い時定数と速い時定数の両方で過渡現象を示します。これらの特性は、電池の電気化学的特性に関連しており、2つのRCチェーンネットワークを使用してモデリングし、遅い時定数と速い時定数を捕捉します。直列接続された抵抗器は瞬間的な電圧降下を捕捉します。

図2: 負荷電流のステップ変化に対する過渡応答([2]の図3(e))



[\[2\]](#)で提案されているLi-ion電気モデルは、[図3](#)に示すように、SOCに依存する電気回路から構成されています。2つのRCチェーンモデルは、シミュレーションの精度とモデルの複雑さのバランスが取れています[\[3\]](#)。追加のRCチェーンを使用して精度を向上させることもできますが、モデルの複雑さが増し、シミュレーション速度に悪影響を及ぼします。

図3: RCチェーンベースのLi-ionセルモデル。



2.1.1 Li-ionセル

回路パラメータは、それぞれの電気化学プロセスに関連しています[4]。

- R1: 電解液、セパレータ、電極を考慮したセルのバルク抵抗。
- RC1: 電極の表面フィルム層の抵抗と静電容量; 高周波インピーダンスを表します。
- RC2: Li-ionセルの二重層容量による低拡散率と静電容量による抵抗。
- V_{oc} : 開回路セル電圧。

電気回路のパラメータは、SOCの関数として変化します。可変抵抗と可変容量、および制御された電圧源は、[2]の式2-7とともに使用し、1つのLi-ionポリマセルをモデリングします。

2.1.2 長所と短所

RCチェーンは、負荷電流のステップ変化時の電池過渡挙動のモデリングを可能にします。ただし、SOCに依存するパラメータ(V_{oc} 、R1、RC1、RC2)を決定するには、対象の電池で広範なテストを実施する必要があります。

[5]のChapter 2では、公称容量1.1AhのA123 APR19650m1 LiFePO4電池のデータを取得するために実施された実験設定とテストについて説明しています。こうした実験には費用と時間がかかる可能性があります。データの収集後、[5]の著者はMatlabのSimulink Design Optimizationツールボックスを使用してモデルのパラメータを抽出しました。パラメータがSOCの関数として決定されると、ルックアップテーブルを使用できます。ただし、これらのルックアップテーブルは、電気回路のシミュレーション時に数値の不安定性をもたらす可能性があるため、注意が必要です。[2]で採用されている連続関数をパラメータに当てはめることにより、パラメータがSOCの滑らかで連続的な微分関数になり、電池による数値不安定性の発生が減少します。

さらに、パワーエレクトロニクスシステムのシステムレベルのシミュレーションで使用する場合、この実装はシステム全体に時定数を提供します。システムが極端にスティッフになり、全体的なシミュレーション速度が低下する可能性があります。最後に、このモデルでは次のことを前提としています:

- 電池容量は変わりません(ポイケルト効果はありません)。
- 温度はモデルの動作に影響を与えません。
- 電池の自己放電は考慮していません。
- 電池にはメモリがありません。

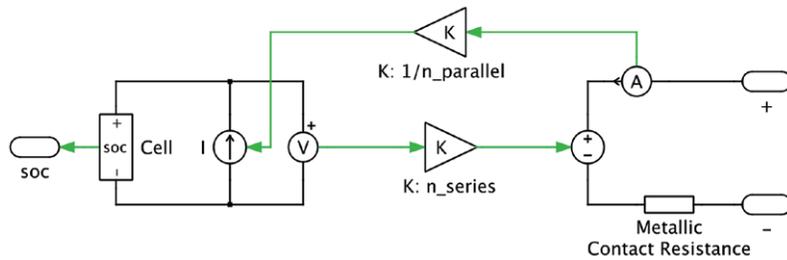
上記の効果を捉えるには、さらに拡張を行う必要があります。これによりモデルの複雑さが増し、シミュレーション速度が低下します。

2.1.3 Li-ionイオン電池パックモデル

上記のセルモデルは、より大きな電池パックの基本的な構成要素として使用できます。電池モジュールを実装する1つの方法は、複数のセルを必要な構成で直列および並列に接続することです。ただし、パックは数百のセルで構成されているため、この構成では、全体的に大きな価値を付加することなく、シミュレーションが非常に遅くなる可能性があります。

別の方法として、[図4](#)の実装を使用することもできます。これは、シミュレーション中にパック内のセルが均等に充電および放電されることを前提としています。電池の端子電流を測定し、パック内の並列分岐の数に応じてスケールダウンして、各セルを流れる電流を決定します。次に、セルの端子電圧は、パック内の直列セルの数によってスケーリングし、パックの端子電圧を決定します。金属の接触抵抗は単純な抵抗器で表され、一定であると仮定します。

図4: RCチェーンベースのセルモデル用リチウムイオンパックモデル



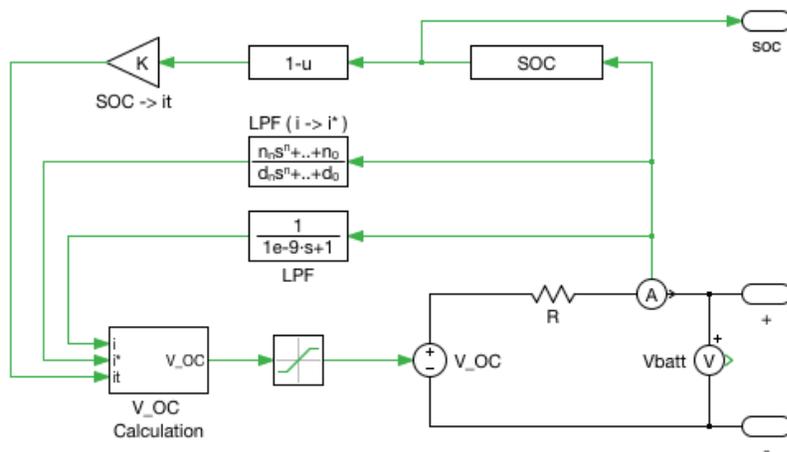
このモデルの実装には、電池パラメータの詳細な抽出が必要です。この研究では、[\[2\]](#)で提案された1セルのLi-ionポリマモデルを実装します。別の電池をモデリングするには、ユーザは実験データや製造元からデータを収集し、SOCの広範囲にわたるパラメータを取得する必要があります。次に、電池のSOCの変化に応じてこれらパラメータの変更を反映するため、各パラメータのフィッティング関数を導出する必要があります。

2.2 抵抗器ベースのLi-ionモデル

RCチェーンベースの電池モデルは、電流負荷ステップで電池の過渡動作を正確に反映するために使用できる電気モデルを提供します。ただし、このモデルにはいくつかの課題が残っています。主な問題は、実験データやメーカーのデータを使用してパラメータを抽出することですが、これらを利用できない場合があります。[\[6\]](#)で提案され[\[7\]](#)で拡張された抵抗のみをベースとしたモデルは、電池のデータシートの情報を使用して、リチウムイオン電池が示す非線形の*I-V*関係を実装します。

[\[6\]](#)で提案されたモデルは、 V_{oc} がSOCの関数として導出されるLi-ion電気回路を実装しています。ただし、この表現は定電流でのみ有効です；バッテリー電流が変動すると不正確になります。[\[7\]](#)では、モデルはさらに拡張され、可変電流でのバッテリーの挙動を正確に反映するようになりました。[図5](#)は[\[7\]](#)で説明されているように V_{oc} が導出されるLi-ionセルの抵抗器のみの電気回路モデルを示しています。 V_{oc} は、SOCとフィルタリングされた電流の関数として決定されます。より高速な過渡特性を持つ2つ目のローパスフィルタも使用し、代数ループを回避すると同時に、電池が充電中か放電中かを示します。

図5: 抵抗をベースとしたLi-ionセルモデル



2.2.1 Li-ionセル

放電中の電池のVOCを支配する方程式は次のとおりです:

$$V_{OC,discharge} = E_0 - K * \left(\frac{Q}{Q-it}\right) * it - K * \left(\frac{Q}{Q-it}\right) * i^* + A * e^{-B * it}$$

充電プロセス中、 V_{OC} は次のように与えられます:

$$V_{OC,charge} = E_0 - K * \left(\frac{Q}{Q-it}\right) * it - K * \left(\frac{Q}{it-0.1*Q}\right) * i^* + A * e^{-B * it}$$

この項は次のとおりです:

- $V_{OC,charge} / discharge$ - 無負荷電圧[V]
- E_0 - 電池定電圧
- K - 分極電圧/抵抗係数[V]
- Q - 電池容量[Ah]
- it - 実際の電池充電量[Ah]
- i^* - フィルタリングされた電池電流 [A]
- A - 指数領域電圧振幅[V]
- B - 指数領域時定数の逆数[Ah]⁻¹

抵抗器ベースのモデルは、電荷曲線の関数としてV上の3つの点を使用して導出できます。これらのポイントは、電池が完全に充電されたとき、指数領域と公称領域が終了するときに取得されます(図1を参照)。A123 リン酸鉄リチウムANR26650M1Bの重要な要因とその値は次のとおりです:

- V_{full} - 完全充電された電圧(3.3V)
- V_{exp} - 指数領域終了時の電圧(3.05V)
- Q_{exp} - 指数領域終了時に充電が枯渇(0.25Ah)
- V_{norm} - 公称領域終了時の電圧(2.9V)
- Q_{norm} - 公称領域終了時に充電が枯渇(2.1Ah)

1Cの速度での放電結果の曲線を図6に示します。 V_{OC} の決定に使用する係数 K 、 A 、 B 、および E_0 は次のとおりです:

- $A = V_{full} - V_{exp}$
- $B = \frac{3}{Q_{exp}}$
- $K = \frac{(V_{full} - V_{norm} + A * (e^{-B * Q_{norm}} - 1) * (Q - Q_{norm}))}{Q_{norm}}$
- $E_0 = V_{full} + K + R * i_{1C-rate} - A$

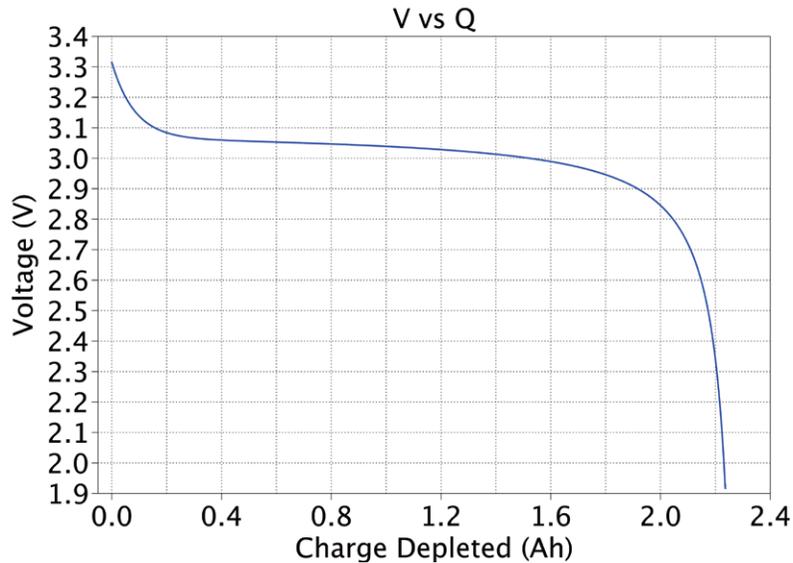
2.2.2 長所と短所

抵抗器ベースのモデルでは、RCチェーンベースの実装とは対照的に、負荷電流のステップに関連する短い過渡時定数と長い過渡時定数は考慮されません。さらに、次のことを前提としています[6]:

- 充電中および放電中の内部抵抗は一定です。
- 電池容量は変わりません(ポイケルト効果はありません)。
- 温度はモデルの動作に影響を与えません。
- 電池の自己放電は考慮していません。
- 電池にはメモリがありません。

上記の効果を捉えるには、さらに拡張を行う必要があります。これらはモデルの複雑化の一因となり、シミュレーション速度に悪影響を及ぼします。しかし、抵抗器ベースの実装では、システムレベルのシミュレーションに重要なマクロレベルの*I-V* [7]特性を正確に反映できます。このモデルの大きな利点は、電池のデータシートの情報を使用して、対象のLi-ion電池を簡単に実装できることです。これにより、実験データやメーカーのデータを取得する必要がなくなります。抵抗器ベースの実装では、RCチェーンに関連付けられた時定数を考慮しないため、シミュレーション速度が速くなります。

図6: 完全放電した電圧



2.2.3 Li-ion電池パックモデル

抵抗器ベースのモデルは、次のように数量をスケールリングすることで、電池パックをモデリングするように拡張できます:

- $V_{OC,pack} = N_{series} * V_{OC,cell}$
- $V_{norm,pack} = N_{series} * V_{norm,cell}$
- $V_{exp,pack} = N_{series} * V_{exp,cell}$
- $R_{pack} = \frac{N_{series}}{N_{parallel}} * R_{cell}$
- $Q_{capacity,pack} = N_{parallel} * Q_{capacity,cell}$
- $Q_{norm,pack} = N_{parallel} * Q_{norm,cell}$
- $Q_{exp,pack} = N_{parallel} * Q_{exp,cell}$

このパックモデルでも、セルが均等に充電および放電されることを前提としています。

3 コンバータのモデリング

Li-ion電池は、数キロから数百キロヘルツのスイッチング周波数で動作するコンバータに接続されます。充電/放電電流と電池パックの容量によっては、バッテリーを数時間充電する必要がある場合があります(シミュレーション時間)。これらのシステムを1時間のシミュレーション時間でシミュレーションし、完全なスイッチングとデジタル制御を行うと、数時間のリアルタイムシミュレーションが必要になります。ソルバは、スイッチング期間よりもさらに短い時間ステップ(多くの場合、 μs スケール)を強制的に実行します。コンバータの平均化モデルと連続制御を使用することで、同じシミュレーションを数秒で実行できます。

この研究では、降圧コンバータを使用して60V入力を降圧し、CCCV充電アルゴリズムで電池を充電します。降圧コンバータの平均化モデルは、次のように導出されました:

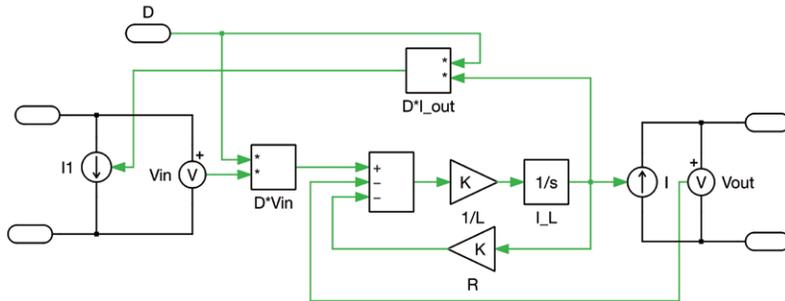
$$\overline{I_L} = \int \frac{D \cdot V_{in} - V_{out}}{L} dt$$

$$I_{out} = \overline{I_L}$$

$$I_{in} = D \cdot I_{out}$$

平均化された降圧コンバータを実装するためのPLECSモデルを図7に示します。この実装は、電圧測定と電流源(可変)による電流注入を使用して実現されます。また、このコンバータには、降圧コンバータのインダクタに直列接続された抵抗器の影響も含まれます。

図7: 降圧コンバータの平均化モデルの実装



コンバータの平均化モデルにより、充電回路の高速シミュレーションが可能になります。ただし、スイッチング効果がキャプチャされなくなるため、制限が厳しくなります。さらに、シミュレーション速度を維持するために継続的な制御を採用する必要があります。デジタル制御方式を追加すると、制御ループの実行頻度に基づくサンプリング時間が導入されます。コンバータの平均化モデリングは、高レベルのアルゴリズム(SOC推定など)を開発する場合に役立ちます。

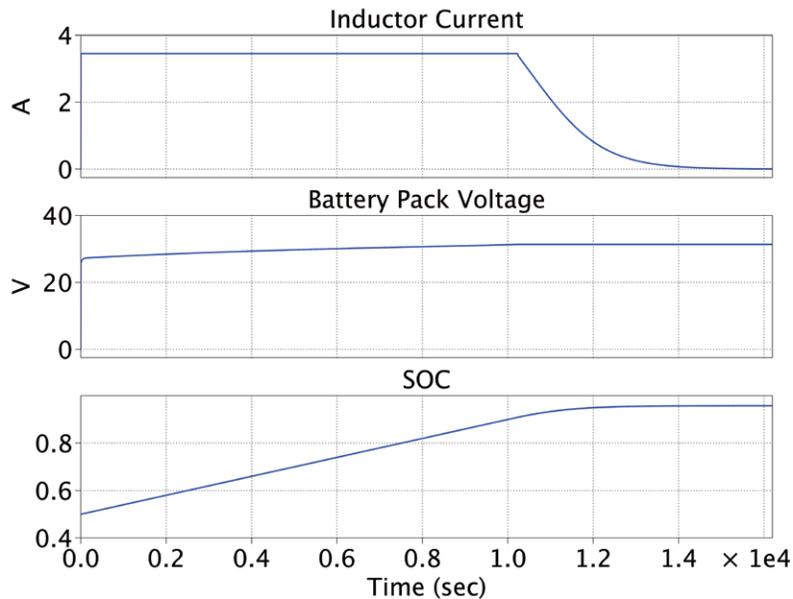
4 シミュレーション結果

2つのシミュレーションモデルを用意しています。どちらのモデルも、CCCV充電アルゴリズムを使用した閉ループ制御の降圧コンバータを実装しています。さらに、どちらのシミュレーションにも、10直列と10並列セルシステムをモデリングするための電池パックが含まれています。その一つは、[2]で提案したRCチェーンベースのLi-ionモデルを実装しています。もう一つは、A123 リン酸鉄リチウムANR26650 M1Bの抵抗器ベースのLi-ionモデルを実装しています。さらに、各モデルは、デジタル制御を備えた完全スイッチングモード、または降圧コンバータと連続制御の平均モデルのいずれかで動作させることができます。

シミュレーションは、初期化タブでSimSetup変数を0に設定することにより、デジタル制御による完全スイッチングモードで3秒間動作するように構成されます。抵抗器ベースのモデルを実行すると、電池のSOCはこの時間でわずかに増加します。電池は3秒間、約13.8Aの定電流で充電されます。この3秒のシミュレーションは、実時間では25秒かかります。RCモデルでも同じ動作モードが利用できます。この場合、3秒のシミュレーションは実時間では47秒かかります。2つのRCチェーンによる複雑さが増すため、シミュレーション時間が長くなります。

シミュレーションは、初期化タブでSimSetup変数を1に設定することにより、連続制御と降圧コンバータの平均モデル実装を使用して4.5時間のシミュレーション時間で動作するように構成されます。どちらのモデルでも、CCCV充電アルゴリズムが実証されています。電池は最初は定電流を使用するため、電池電圧はゆっくりと上昇しながら充電されます。ある時点で、定充電電圧の制限に達し、充電電流が徐々に減少して、電池端子の電圧を一定の電圧に維持します。電池が90% SOCに達すると、コントローラのデューティ比をゼロに設定して充電器をオフにします。4.5時間のシミュレーションは、抵抗器ベースモデルとRCベースモデルの両方で実時間0.5秒未満で完了します。図8は、降圧コンバータと連続制御の平均モデルを用いた抵抗器ベースのLi-ionモデルのシミュレーション結果を示しています。

図8: Li-ion電池パックのCCCV充電のシミュレーション結果。連続コントローラを備えた降圧コンバータの平均化モデルを、抵抗器ベースのLi-ion電池モデルに使用。



5 付録

A シミュレーションファイル - PLECS Blockset

このアプリケーションノートには、PLECS Blocksetでさまざまな電池セルモデルのシミュレーションに使用するサンプルファイルを添付しています:

- *Li_ion_RCModel.mdl*: このデモは、RCチェーンでモデリングしたLi-ion電池パックのCCCV充電を示します。シミュレーションは、初期化タブのSimSetup変数を0に設定して完全スイッチングモードで実行するか、1に設定して平均スイッチングモードで実行するように設計されています。
- *Li_ion_RCModel_init.m*: 上記のモデルのパラメータ値を初期化します。
- *Li_ion_RonlyModel.mdl*: このデモは、抵抗器ベースのLi-ion電池パックモデルのCCCV充電を示します。シミュレーションは、初期化タブのSimSetup変数を0に設定して完全スイッチングモードで実行するか、1に設定して平均スイッチングモードで実行するように設計されています。
- *Li_ion_RonlyModel_init.m*: 上記のモデルのパラメータ値を初期化します。

B シミュレーションファイル - PLECS Standalone

このアプリケーションノートには、PLECS Standaloneでさまざまな電池セルモデルのシミュレーションに使用するサンプルファイルを添付しています:

- *Li_ion_RCModel.plecs*: このデモは、RCチェーンでモデリングしたLi-ion電池パックのCCCV充電を示します。シミュレーションは、初期化タブのSimSetup変数を0に設定して完全スイッチングモードで実行するか、1に設定して平均スイッチングモードで実行するように設計されています。
- *Li_ion_RonlyModel.mdl*: このデモは、抵抗器ベースのLi-ion電池パックモデルのCCCV充電を示します。シミュレーションは、初期化タブのSimSetup変数を0に設定して完全スイッチングモードで実行するか、1に設定して平均スイッチングモードで実行するように設計されています。

6 参考文献

- [1]L. Benini, G. Castelli, A. Macii, E. Macii, M. Poncino, and R. Scarsi, “Discrete-time battery models for system-level low-power design,” *IEEE Transaction on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2001.
- [2]C. Min and G. Rincon-Mora, “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504 – 511, June 2006.
- [3]H. Zhang and M.-Y. Chow, “Comprehensive dynamic battery modeling for phev applications,” *2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010*.
- [4]L. Lam, P. Bauer, and E. Kelder, “A practical circuit-based model for li-ion battery cells in electric vehicle applications,” *IEEE 33rd Int. Telecommun. Energy Conf. (INTELEC)*, pp. 1–9, 2011.
- [5]J. Issac, “Modeling and state of charge estimation of li-ion batteries for vehicular applications,” Master’s thesis, Purdue University, 2013.
- [6]O. Tremblay, L.-A. Dessaint, and A.-I. Dekkiche, “A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles,” *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007*.
- [7]O. Tremblay and L.-A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications,” *World Electric Vehicle Journal, 2009*.

改訂履歴:

02-16

初版

plexim

☎ +41 44 533 51 00

+41 44 533 51 01

✉ Plexim GmbH

Technoparkstrasse 1

8005 Zurich

Switzerland

@ info@plexim.com

<http://www.plexim.com>

Pleximへの連絡方法:

Phone

Fax

Mail

Email

Web

KESCO KEISOKU ENGINEERING SYSTEM

計測エンジニアリングシステム株式会社

<https://kesco.co.jp/>

Application Examples

© 2002–2016 by Plexim GmbH

このマニュアルに記載されているソフトウェアPLECSは、ライセンス契約に基づいて提供されています。ソフトウェアは、ライセンス契約の条件の下でのみ使用またはコピーできます。Plexim GmbHの事前の書面による同意なしに、このマニュアルのいかなる部分も、いかなる形式でもコピーまたは複製することはできません。

PLECSはPlexim GmbHの登録商標です。MATLAB、Simulink、およびSimulink Coderは、The MathWorks, Inc.の登録商標です。その他の製品名またはブランド名は、それぞれの所有者の商標または登録商標です。