

Application Examples

Modeling a Lithium-Ion Cell using PLECS

Dr. John Schönberger

PLECSを使用したリチウムイオン電池のモデリング

Version: 03-13

1 はじめに

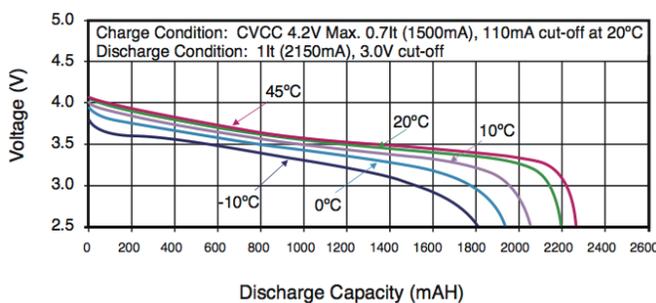
リチウムイオン電池は、エネルギー密度が高く、メンテナンスの必要性が低いことから、携帯型電子機器や電気自動車で広く使用される技術となっています。

リチウムイオン電池は、数秒から数年にわたる時間単位で観察できるさまざまな電位を示します。数ミリ秒から数秒単位で発生する短期的な影響は通常、負荷の段階的な変化による電圧および電流の過渡現象です。この期間では、内部セル電圧と動作温度は一定であると想定できます。

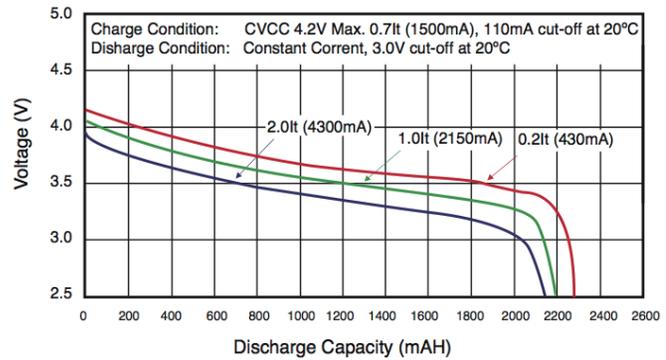
数秒から数時間の中期的な時間範囲では、セル電圧の放電状態 (state of discharge: SOD) と温度への依存性を観察できます。数日から数年に及ぶ長期間では、保管温度とサイクルがセルの寿命に与える影響が重要になります。

このレポートでは、中期的影響をモデル化するリチウムイオンセルの電気的および熱的モデルを紹介します。パナソニックのセルCGR18650CG 3.6V 2250mAhに基づくサンプルシミュレーションモデルです。中期的な影響はメーカーのデータシートから直接確認できるため、モデルの導出は簡単なプロセスになります。CGR18650CGセルの動作を [図1](#) に示します。バッテリーが完全充電されると、出力電圧が約4.1Vになることがわかります。放電中、エネルギーを消耗するまで出力電圧はほぼ直線的に減少します。この段階で出力電圧は急激に低下します。3.0V未満では、セルは空であるとみなされ再充電する必要があります。

図1: CGR18650CGリチウムイオンセルの放電曲線(出典: パナソニック社データシート, 2008年12月)



(a) セル出力電圧と最終容量に対する温度の影響



(b) 負荷電流がセル容量(最終SOD)に与える影響

[図1](#)(a)は温度変化が2つの影響を及ぼすことを示しています。1つは最終放電容量を低下させることであり、もう1つはセルの出力電圧を低下させることです。[図1](#)(b)に示す放電率の影響は、放電率を上げると放電容量や最終SODが減少することを示しています。このグラフの出力電圧の違いは、セルの内部抵抗による電圧降下によるものです。

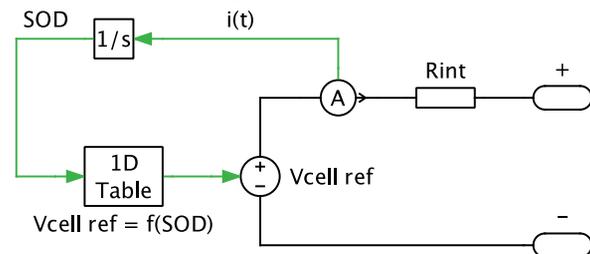
2 リチウムイオンセルモデル

PLECS Lithium-ion cellモデルは、[\[1\]](#)で提示されたリチウムイオンセルの動作モデルと類似しています。基準内部電圧は固定温度と放電率に対してモデル化され、温度と放電率の影響を考慮するために補正係数を適用します。

2.1 モデル概念

リチウムイオンセルモデルの概念は、[図2](#)に示すように、内部電圧と内部抵抗を使用してセルをモデル化することです。基準内部セル電圧は放電状態式(1)の非線形関数であり、放電状態はセル出力電流式(2)を積分することによって計算されます。

図2: リチウムイオンの概念モデル



$$V_{cell\ ref} = f(SOD) \tag{1}$$

$$SOD = \int_0^t i(t) dt \tag{2}$$

$V_{cell\ ref}$ をモデル化するためのデータは、 $T = 20^\circ\text{C}$ および $i(t) = 2.15\text{A}$ で測定された出力電圧曲線に基づいています。図1(b)に示している曲線は $V_{out\ ref}$ と呼ばれます。

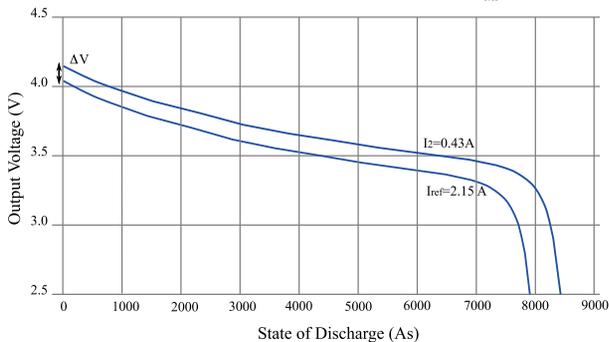
2.2 内部抵抗

$V_{out\ ref}$ から $V_{cell\ ref}$ を計算するには、セルの内部抵抗を計算する必要があります。初期の内部抵抗は、製造元の電圧曲線から次のように計算します:

$$R_{int} |_{SOD=0} = \frac{\Delta V}{I_{ref} - I_2} \tag{3}$$

図3に示すように、結果の値は $0.07\ \Omega$ です。多くの場合、変動は小さい傾向があり、実際の値は通常、有効な負荷抵抗よりもはるかに小さいため、 R_{int} は一定であると想定できます。

図3: データシートの出力電圧曲線から初期内部抵抗 R_{int} を計算



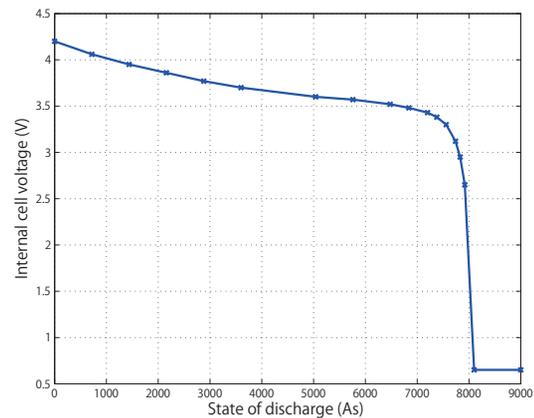
2.3 内部セル電圧

基準内部セル電圧は、基準出力電圧曲線に一定の内部電圧降下を加算することによって計算します:

$$V_{cell\ ref} = V_{out\ ref} + I_{ref} R_{int} \tag{4}$$

結果は、図4に示すように、非線形関数 $V_{cell\ ref} = f(SOD)$ になります。PLECSでは1Dルックアップテーブルとしてモデル化されており、この関数は線形補間を使用して、記録されたデータポイント間の $V_{cell\ ref}$ の値を計算します。

図4: 基準内部セル電圧 $V_{cell\ ref}$ をSODの非線形関数としてモデル化するためのデータポイント(基準動作点は $T = 20^\circ\text{C}$, $i(t) = 2.15\text{A}$)



2.4 容量の変化を考慮

これらの変化の影響は、式(2)の $i(t)$ に電流依存の放電率係数 $k1$ と温度依存の温度率係数 $k2$ を乗算することでモデル化できます:

$$SOD = \int_0^t k1[i(t)].k2[T(t)].i(t) dt$$

放電率係数 $k1$ は、各出力電圧曲線の最終SODを使用して図1(b)から計算されます:

$$k1[I_n] = \frac{SOD\ final(I_{ref})}{SOD\ final(I_n)} \tag{5}$$

$k1$ の一連の結果を図5に示します。

図5: 放電率係数1と出力電流の比較

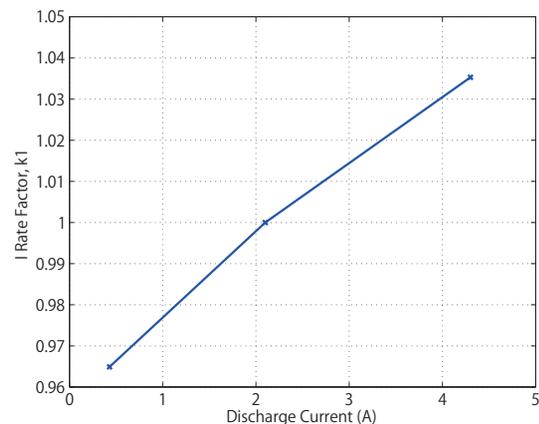
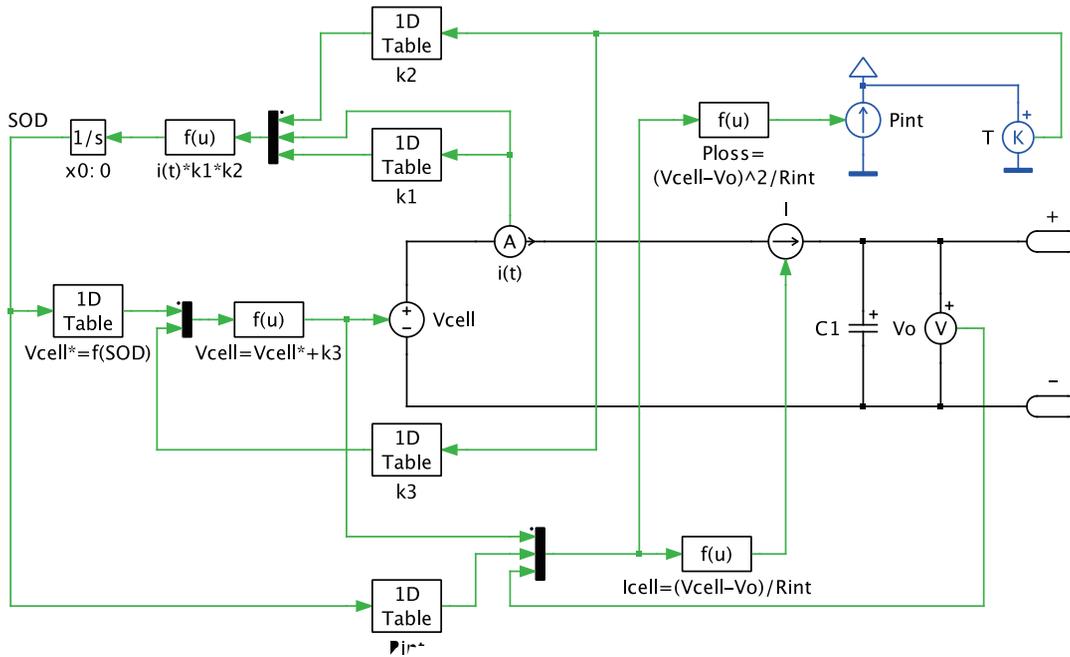


図6: 完成したリチウムイオンセルモデル(内部損失 P_{int} はセルケースに自動的に注入)



温度率係数 $k2$ は、[図1\(a\)](#)の一連の出力電圧曲線から同様の方法で計算されます。 $k1$ と $k2$ は一定ではなく、それぞれ出力電流と温度に依存するため、ルックアップテーブルを使用します。

2.5 内部電圧変化のモデリング

温度が下がると容量が減少するだけでなく、セル電圧も低下します。温度に依存する電圧の変化は、電圧補正係数 $k3$ を内部電圧に追加することを考慮します。したがって:

$$V_{cell}(t) = V_{cell\ ref}(t) + k3[T(t)] \quad (6)$$

電圧補正係数 $k3$ は、[図1\(a\)](#)から各出力電圧曲線の初期電圧を基準曲線の初期電圧から差の比例として計算されます:

$$k3[T_n] = V_n(0) - V_{ref}(0) \quad (7)$$

3 セル出力インタフェース

式(6)で計算されたリチウムイオンセル電圧は、出力キャパシタに供給する電流源に変換されます。電流源は次のように計算されます:

$$I_{cell} = \frac{V_{cell} - V_o}{R_{int}} \quad (8)$$

[図6](#)に示す完全なリチウムイオンモデルは、PLECSのサブシステムとして実装されています。出力キャパシタは、出力電流に対する電流源の状態依存性を排除し、代数ループを防止します。リチウムイオンモデルは以下をサポートします:

- 代数ループを発生させずに定電流および定電力負荷を供給
- 電圧または電流源コンバータとの直接接続

このモデルは、より高い精度が求められる状況に備えて、可変内部抵抗の実装もサポートしています。可変内部抵抗はSOCに依存し、実験による測定から導き出される必要があります。

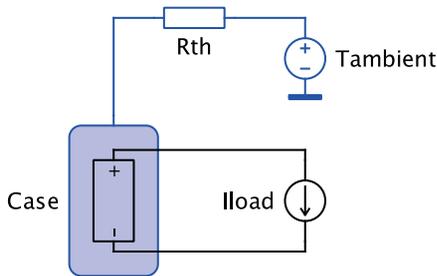
4 熱モデル

セルの熱特性は、PLECSの熱等価回路でモデル化されます。ケースはヒートシンクで表され、熱電力はケースと環境の間のインピーダンスを介して流れます。ケースによって収集される損失は、内部抵抗で消費される電力によるものです。これらの損失は次のように計算されます:

$$P_{int} = \frac{(V_{cell} - V_o)^2}{R_{int}} \quad (9)$$

図7に示すリチウムイオンモデルの最上位レベルは、セルの熱モデルを示しています。ヒートシンクに複数の端子を追加し、バッテリーパックアプリケーションに存在する複数の熱経路をモデル化できます。

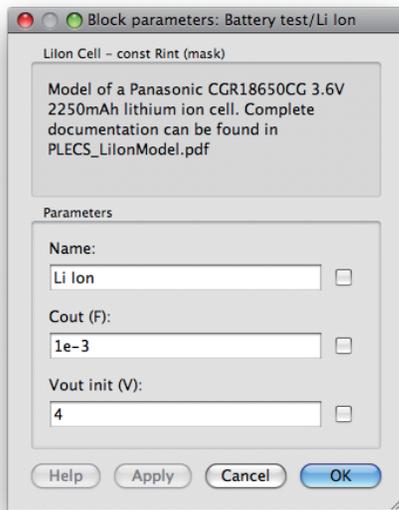
図7: 完成したリチウムイオンセルモデル: 内部損失 P_{int} はセルケースに自動的に注入されます。



5 モデルパラメータ

モデルのパラメータダイアログを図8に示します。

図8: リチウムイオンモデルのパラメータダイアログ



パラメータの説明は次のとおりです:

- C_{out} : リチウムイオンセルの出力容量。定電流および定電力負荷をセルに接続できるようにするには、この値がゼロより大きくなければなりません。

- $V_{out\ init}$: 出力キャパシタ両端の初期電圧。
- R_{int} (内部抵抗): SOD, R, R_{int} のベクトル値で表されます。固定抵抗モデルの場合、単一の R_{int} を使用します。
- k_1 (放電率係数): I_{rate}, x_{val} および I_{rate}, k_1 によって表されます。
- k_2 (温度率係数): T_{rate}, x_{val} および T_{rate}, k_2 のベクトル値で表されます。
- k_3 (電圧補正係数): T_{rate}, x_{val} および V_{offset}, k_3 のベクトル値で表されます。

6 付録

このアプリケーションノートには、PLECSを使用してさまざまなバッテリーセルモデルをシミュレートするために使用するサンプルファイルが付属しています:

- *Lithium_ion_variable_R.plecs*: このレポートで説明されている可変内部抵抗と熱回路を含むフルセルモデル。
- *Lithium_ion_constant_R.plecs*: 一定の内部抵抗と熱回路が組み込まれたセルモデル。可変抵抗の効果が重要でない場合に使用できます。
- *Lithium_ion_constant_T.plecs*: 内部抵抗と周囲温度が一定のセルモデル。セルケースの熱回路はモデル化されていません。このモデルは、電圧とSODの特性のみが重要な単純なモデルに適しています。
- *CGR18650CG_data.mat*: データシートに記載されている、パナソニックCGR18650CG 3.6V 2250mAhセルデータを含むマトリクス。

7 参考文献

- [1] L. Gao, S. Liu, and R. Dougal, "Dynamic lithium-ion battery model for system simulation," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 25, pp. 495–505, September 2002.

改訂履歴:

03-13

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

Advancing Automation
ADVAN AUTO

☎ +81 3 5282 7047

+81 3 5282 0808

✉ ADVAN AUTOMATION CO.,LTD Mail

1-9-5 Uchikanda, Chiyoda-ku

Tokyo, 101-0047

Japan

@ info-advan@adv-auto.co.jp

<https://adv-auto.co.jp/>

アドバンオートメーションへの連絡方法:

Phone

Fax

Email

Web

Application Examples

© 2002–2013 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。