

蓄電池内部温度管理に基づく最適温度充電システム

山本祐介^{†1} 加藤啓路^{†1} 北川友貴^{†2} 福井正博^{†3}

環境温度と蓄電池表面温度から蓄電池内部の温度を推定管理するシステムと、蓄電池劣化等を抑制するための最適温度制御を行いながら急速充電を行うシステムを構築した。システムの構成としては、アナログインタフェースを有する PSoC マイコン、FPGA 等を用いた。システムの構成法と最適化の実験評価について述べる。

A thermal optimal charging system based on inner battery temperature management

YUSUKE YAMAMOTO^{†1} KEIJI KATO^{†1}
YUKI KITAGAWA^{†2} MASAHIRO FUKUI^{†3}

We have constructed inner temperature estimation system. The system can estimate inner temperature by surface and ambient temperature of lithium-ion battery. We also constructed variable speed charger to reduce degradation of battery. These systems have PSoC microcontroller and FPGA. This paper presents about configuration of the systems and test evaluation of optimization.

1. はじめに

近年、低炭素化社会の実現に向けて、電気自動車やスマートグリッドの普及が進みつつある。現在、これらのシステムの多くにはリチウムイオン蓄電池が用いられている。リチウムイオン蓄電池には、高エネルギー密度やメモリー効果がないなど、様々な利点を持つと同時に、多くの劣化要因も存在する。特に、機器の動作や充放電の際に生じる熱による温度上昇は、劣化を引き起こすだけでなく、安全性にも関わる問題である。

我々は、蓄電池の温度特性を得るために、蓄電池内部の温度の推定管理を行うシステムを構築した。このシステムでは環境温度と蓄電池の表面温度から内部の温度を推定するシステムとなっている。また、最適温度制御を伴う急速充電システムの構築も行った。本稿では、これらのシステムの構成や温度最適化の評価実験について述べる。

2. 内部温度推定式

2.1 リチウムイオン蓄電池の熱要因

リチウムイオン電池は、充放電を行うことによって熱が発生する。これには 2 つの要因があり、1 つは電気的な内部抵抗によるジュール発熱であり、もう一方は電池内部の化学反応によるエントロピー発熱である。これらは以下の式で表される。[1]

$$Q_p = i \cdot (V_o - V_{oc}) = i^2 \cdot R_n \quad (1)$$

$$Q_s = i \cdot T_{in} \cdot \frac{\partial V_{oc}}{\partial T_{in}} \quad (2)$$

Q_p [J/S]は単位時間あたりのジュール発熱量、 Q_s [J/S]は単位時間あたりのエントロピー発熱量である。また、 i は電池の放電電流である。 V_o [V]は電池電圧、 V_{oc} [V]は開回路電圧、 R_n [Ω]は電池の内部抵抗、 T_{in} [K]は電池の内部温度である。また、電池表面から放出される熱量 Q_{OUT} は以下の式で表される。

$$Q_{OUT} = A \cdot h(T_s - T_a) \quad (3)$$

A [m²]は電池の表面積、 T_s [K]は電池表面の温度、 T_a [K]は環境温度を表す。 h は熱伝達係数であり、ヌセルト数 Nu で表される。さらにヌセルト数はグラスホフ数 Gr とプラントル数 Pr で表される。

$$h = \frac{Nu\lambda}{d} \quad (4)$$

$$Nu = \alpha(GrPr)^{0.25} \quad (5)$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_a)d^3}{\nu^2} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (7)$$

λ [W/(m・K)]は流体の熱伝導率、 d [m]は電池の代表長さである。ヌセルト数は多くの場合、予測が困難であり、数多くの予測式から経験的に予測される。 α は複数の実験結果より経験的に決められており、電池の形状により決定される。本稿で用いる円筒型セル(Panasonic 製、CGR-18650CH)の場合は 0.53 となる。[2] g [m/s²]は重力加速度、 β [1/K]は流体の体膨張係数で、空気の場合は温度を T とすると $1/T$ となる。 ν [m²/s]は動粘性係数、 a [m²/s]は温度拡散係数で、共に物性値である。

^{†1} 立命館大学大学院 理工学研究科 電子システム専攻
Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University,
^{†2} 立命館大学 理工学部 電子情報デザイン学科
Department of VLSI System Design, Ritsumeikan University
^{†3} 立命館大学 理工学部 電子情報工学科
Department of VLSI System Design, Ritsumeikan University

2.2 内部温度推定式

リチウムイオン蓄電池の内部温度と熱量の関係は、電池内部の熱抵抗を R_{in} [K/W]、電池外部の熱抵抗を R_a [K/W]とし、電池の熱容量 C_{in} [J/K]、電池内部で発生する熱流量の総和 Q_{ALL} [J/S]と、熱抵抗の総和 R_T [K/W]を用いて、以下の式で表される。

$$C_{in} \frac{\partial T_{in}(t)}{\partial t} = - \frac{T_{in}(t) - T_a}{R_T} + Q_{ALL} \quad (8)$$

$$Q_{ALL} = Q_P + Q_S \quad (9)$$

$$R_T = R_{in} + R_a \quad (10)$$

R_a は、式(3)より、以下で示される。

$$R_a = \frac{1}{Ah} \quad (11)$$

良く知られているように、発熱や伝熱挙動は、電気回路における電圧上昇や電圧伝搬と同じ微分方程式で表現されるため、熱回路を用いた表現が行われる。熱回路において、温度 T [K]、熱流量 Q_T [J/S]、熱抵抗 R_T [K/W]、熱容量 C_T [J/K]、熱量 H [J]は、電気回路における電圧 V 、電流 I 、電気抵抗 R_E 、静電容量 C_E 、電荷量 Q_E に対応づけられ、オームの法則や過渡応答などが同様に成立する。上述の(8)式は、電気回路では以下の図のように表現できる。

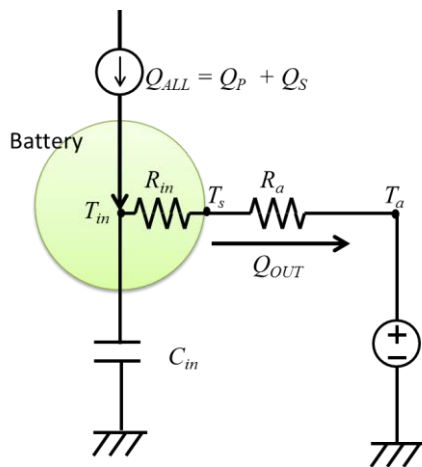


図 1 蓄電池および周辺の熱回路

この熱回路において、 R_{in} と R_a を流れる熱流量は等しいので、

$$\frac{R_{in}}{T_s(t) - T_{in}(t)} = \frac{R_T}{T_{in}(t) - T_a} \quad (12)$$

が成立し、(8),(12)より、次の式(13)が導出される

$$R_{in} = \frac{T_s(t) - T_{in}(t)}{C_{in} \frac{\partial T_{in}(t)}{\partial t} - Q_{ALL}} \quad (13)$$

熱容量 C_{in} は微小時間 Δt [sec]において、熱流量 Q_{all} が変化しないと仮定すると、以下の式で算出される。これは、放電中のある時刻 t [sec]から、 $t + \Delta t$ [sec]までのと、の総和を、同区間での表面温度の変化量で割ったものである。

$$C_{in} = \frac{\Delta t \{Q_{ALL} - Q_{OUT}\}}{T_{in}(t + \Delta t) - T_{in}(t)} \quad (14)$$

これらの式から、 $t=0$ の時の内部温度を T_a とし、かつ、SOCを固定した場合の内部温度過渡応答が以下の式で与えられる。

$$T_{in}(t) = \left[1 - \exp\left\{-\frac{t}{R_T C_{in}}\right\} \right] Q_{ALL} R_T + T_a \quad (15)$$

これを、(9)式および(2)式を用いて、 Q_{ALL} を展開し、 $T_{in}(t)$ で整理すると、次式(15)が得られる。

$$T_{in}(t) = \frac{\left[1 - \exp\left\{-\frac{t}{R_T C_{in}}\right\} \right] Q_P R_T + T_a}{1 - \left[1 - \exp\left\{-\frac{t}{R_T C_{in}}\right\} \right] i R_T \frac{\partial V_{OC}}{\partial T_{in}}} \quad (16)$$

また、(8)式において、微小時間 Δt に対して、時間 t から時間 $t + \Delta t$ の間、 T_a 、 R_T 、 Q_{ALL} 、 C_{in} がほとんど変化しないと仮定すると、 $\frac{\partial T_{in}(t)}{\partial t}$ は差分 $\frac{T_{in}(t + \Delta t) - T_{in}(t)}{\Delta t}$ に置き換えることができるので、次式(17)のように、 $T_{in}(t)$ が与えられたときに、微小時間 Δt 後の温度上昇 $T_{in}(t + \Delta t)$ を求めることができる。

$$T_{in}(t + \Delta t) = T_{in}(t) + \frac{\Delta t \left(Q_{ALL} - \frac{T_{in}(t) - T_a}{R_T} \right)}{C_{in}} \quad (17)$$

3. 内部温度推定システム

この章では、構築した内部温度推定システムについて述べる。このシステムでは PSoC マイコンや FPGA などを用いており、前章で述べた内部温度推定式を計算することにより電池内部の温度を推定する。

3.1 パラメータ

実装した推定式の計算に必要なパラメータの算出方法や、システム内での表現方法を述べる。

ジュール発熱 Q_P およびエントロピー発熱 Q_S は、推定式を算出する度に、実測値から計算を行う。ジュール発熱は、算出時に測定した電流 i および電圧 V と、後に述べる近似式で算出する開回路電圧 V_{OC} を元に算出する。エントロピー発熱は測定電流 i 、近似式から算出した V_{OC} を用いる。ただし、エントロピー発熱については内部温度 T_{in} が必要となる。初期温度は表面温度と同一と仮定し、表面温度 T_s を用いる。以降は前状態の T_{in} を現在の内部温度と仮定して用いる。

SOC (State of Charge) とは、電池の残量を示す指標で、SOC=1.0 を満充電状態、SOC=0.0 を満放電状態とする。現

システムでは、推定開始時が満充電状態または満放電状態から開始するとし、推定開始からの時刻を t における $SOC(t)$ を次式により表現する。

$$SOC(t) = \frac{W(t - \Delta t) - i(t) \cdot \Delta t}{W_{full}} \times 100[\%] \quad (18)$$

$W_{full}[\text{Ah}]$ は電池容量、 $W(t - \Delta t)[\text{Ah}]$ は前状態での電池容量とする。 $i(t)[\text{A}]$ は測定時の電流値であり、放電電流を正とする。 $\Delta t[\text{hour}]$ は前状態からの経過時間を示す。上記の式は、前状態からの容量変化分を加算または減算し、それを満充電時の容量の割合で表すことで SOC を算出する。

熱伝導率 λ 、動粘性係数 ν 、温度拡散係数 α はそれぞれ、流体である空気の状態により変化する値である。これらを逐次計測するのは非常に困難であるため、200～350[K]での実測値[2]に基づき、2次関数を用いて近似した。(図2～図4) R_a は、 T_s 、 T_a とこれらの係数値に基づき計算する。

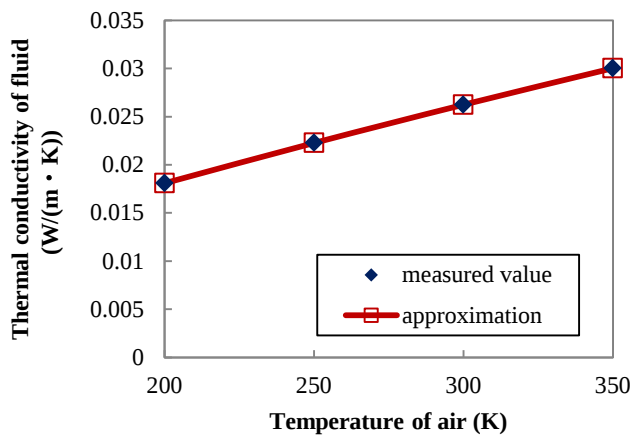


図 2 熱伝導率 λ

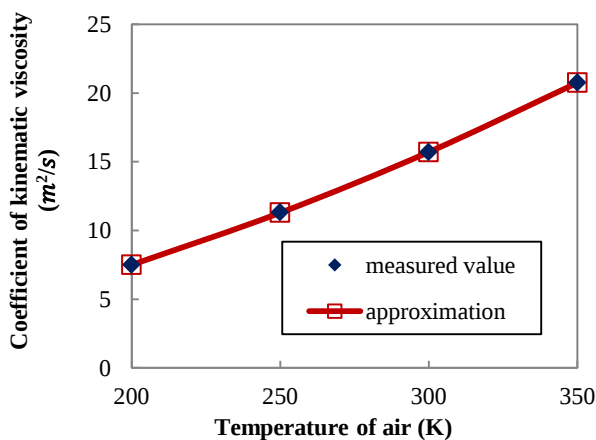


図 3 動粘性係数 ν

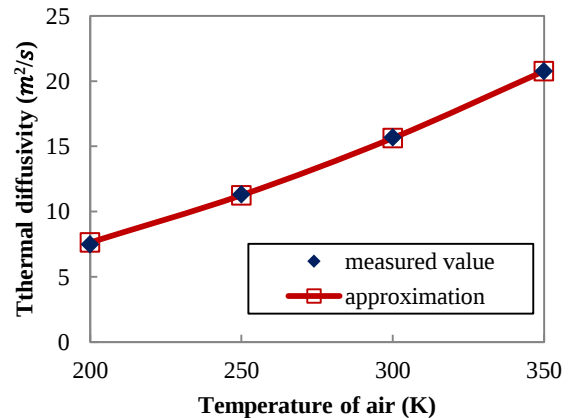


図 4 温度拡散係数 α

熱容量 C_{in} および内部熱抵抗 R_{in} は、 SOC や環境温度への依存が見られた。これらのパラメータに関しては、あらかじめ測定を行った上で、マイコン上でテーブル化し、近似式に置き換えたものを用いて推定を行う。図5に熱容量 C_{in} を、図6に内部熱抵抗 R_{in} をそれぞれ示す[3]。

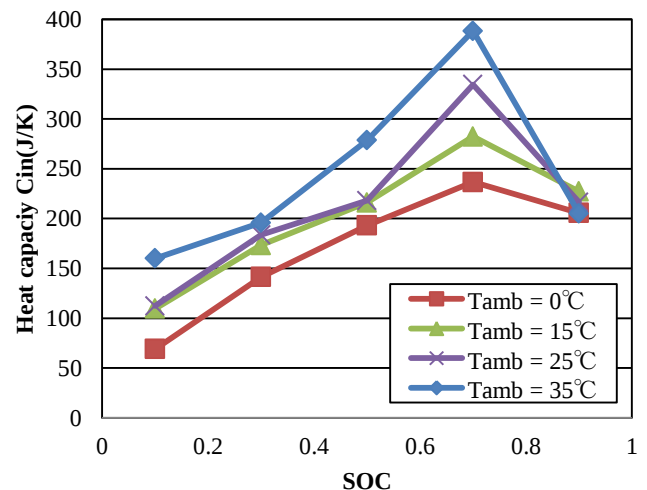


図 5 熱容量 C_{in}

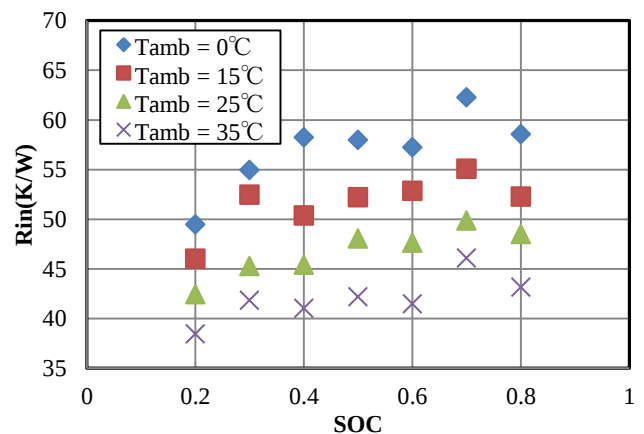


図 6 内部熱抵抗 R_{in}

ジュール発熱やエントロピー発熱，内部温度推定式の算出の際には開回路電圧 V_{oc} の値が必要となる．あらかじめ測定した V_{oc} を元に，近似式を作成し推定に用いる．近似式は以下の1次関数で表す．（図7）

$$V_{oc}(SOC) = 0.739 \cdot SOC + 3.37 \quad (19)$$

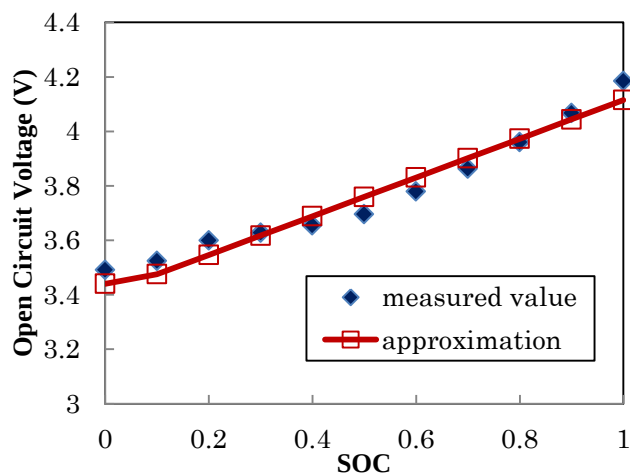


図7 開回路電圧 V_{oc}

3.2 システム構成

図8に内部温度推定システムの写真を示す．このシステムには主にPSoCマイコン，FPGA，シャント抵抗，2つのデジタル温度センサから構成される．

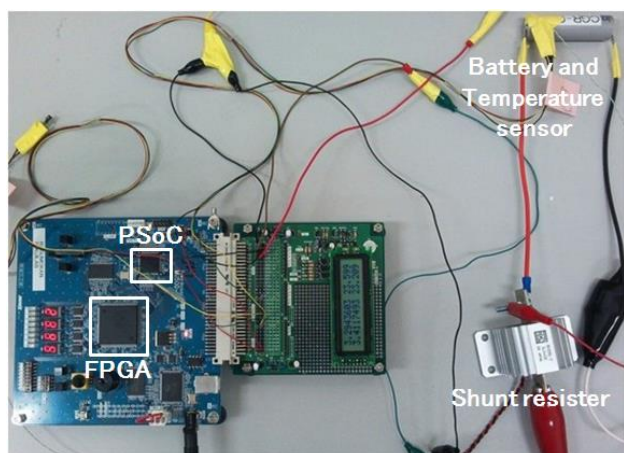


図8 内部温度推定システム

また，図9にシステムのブロック図を示す．点線内がPSoCマイコン上で実現されている回路である．マイコン上では3つのモジュールを用いている．PGAは蓄電池およびシャント抵抗の電圧値を取り込みや信号の増幅を行う．

DUALADCは2入力同時変換可能なA/Dコンバータであり，PGAからのアナログ信号をデジタル値に変換して，CPU上で取り扱える値に変換する．PWMは周期を設定するために用いており，図10に示すようなパルス波を発生させ，立ち上がりで測定や推定式の計算を開始する．

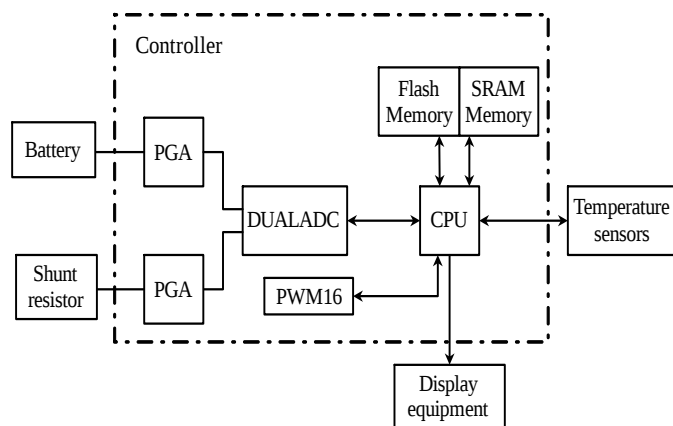


図9 システムブロック図

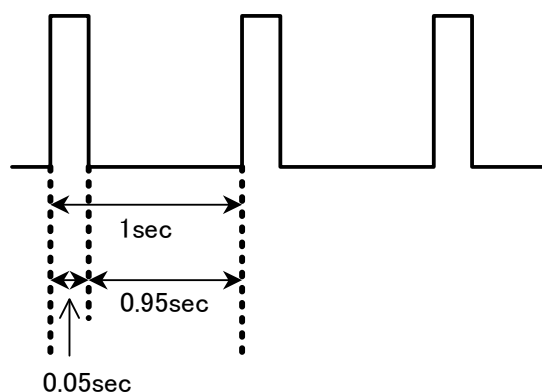


図10 PWMによる出力波形

3.3 プログラム動作

図11にマイコン上に搭載するプログラムのフローチャートを示す．システムが動作を開始すると，はじめにデジタル温度センサとの通信を開始する．次に，環境温度 T_a ，電池表面温度 T_s ，電流 i および電圧 V_0 の4つのパラメータを測定する．測定した電流値を用いて，SOCの値を更新する．算出したSOCや環境温度に依存する V_{oc} ， C_{in} および R_{in} の3つのパラメータを，近似式またはテーブルから算出する．これらの測定や算出から得られた全てのパラメータを用いて熱要因の Q_s ， Q_p および R_a を算出し，最後に内部温度 $T_{in}(t)$ を求める．電池の充放電が終了するまで繰り返し同じ動作を行うことで，内部温度の変化を把握することができる．

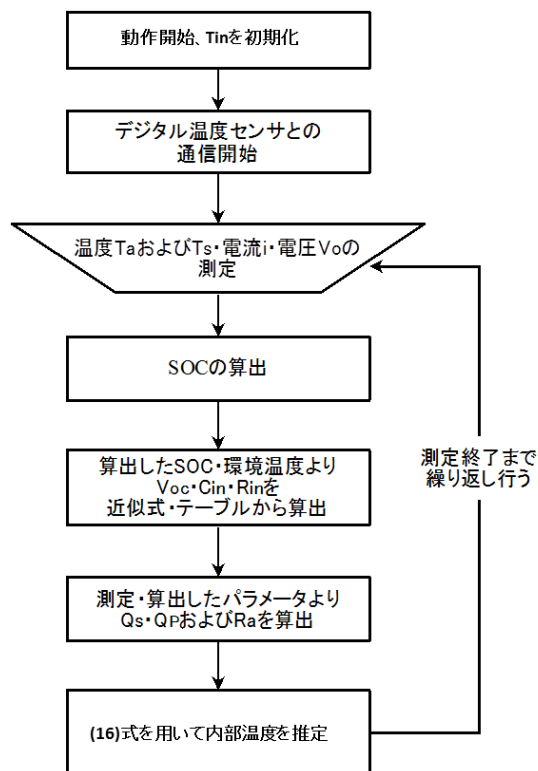


図 11 プログラムフローチャート

3.4 動作結果

このシステムで推定を行った結果を図 12 に示す。動作は電池を恒温槽内に設置した状態で行い、環境温度は 35[°C]とした。

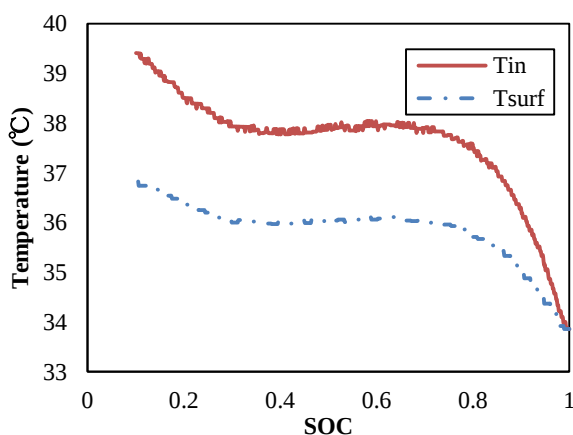


図 12 内部温度推定結果 (環境温度 35[°C])

このグラフは、電流量 1C[A]で放電を行った場合の推定結果である。1C とは電池を 1 時間で満充電することのできる電流量のこと、本稿で用いた電池は公称容量が 2250[mAh]であるので、1C は 2.25[A]となる。

4. 最適温度充電システム

4.1 可変速急速充電システム

急速充電において、温度上昇や劣化の抑制を目的とした可変速急速充電システムの構築を行った。リチウムイオン蓄電池の充電には、CC-CV (Constant Current-Constant Voltage: 定電流・定電圧) 充電が一般的に用いられている。このシステムでは CC-CV 充電のうち、CC 充電部分を変速させることで、温度上昇抑制および充電時間短縮を図っている。図 13 に通常の CC-CV 充電と可変速 CC-CV 充電の概要を示す。

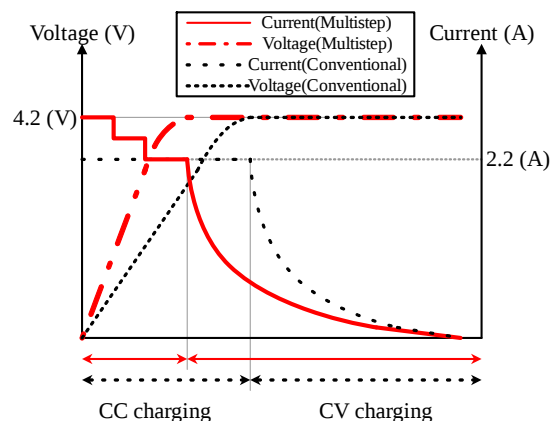


図 13 CC-CV 充電概要図

通常の CC-CV 充電においては、CC 充電部分は電流値が不変である。可変速充電システムでは、この CC 充電部分の電流値を段階的に変化させることで、温度上昇を抑えつつ充電時間を短縮する。

可変速充電と 1C および 1.2C 充電による温度上昇と充電時間を比較したグラフを図 14 に示す。この結果は、CC-CV 充電における CC 充電部分のみの温度上昇および充電時間を表している。充電電圧が上限の 4.2V に達した時点で CC 充電終了とする。

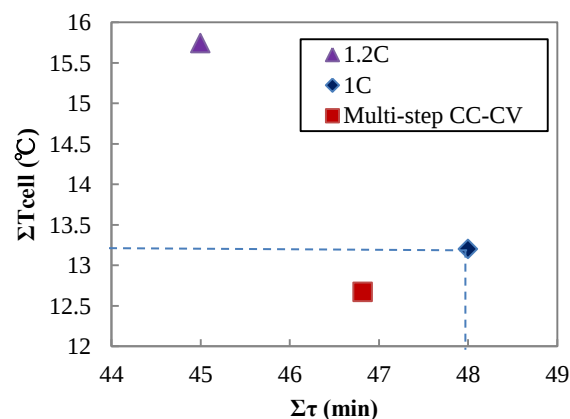


図 14 充電手法による温度と充電速度の比較

1C 充電との比較の場合、可変速充電では約 1 分の充電時間短縮、約 1°C の温度上昇抑制が実現された。1.2C との比較では、充電時間に関しては大きくなってしまっているものの、温度上昇に関しては約 3°C と大幅に抑制することが可能となっている。図 15 に各充電手法における温度上昇の時間変化のグラフを示す。

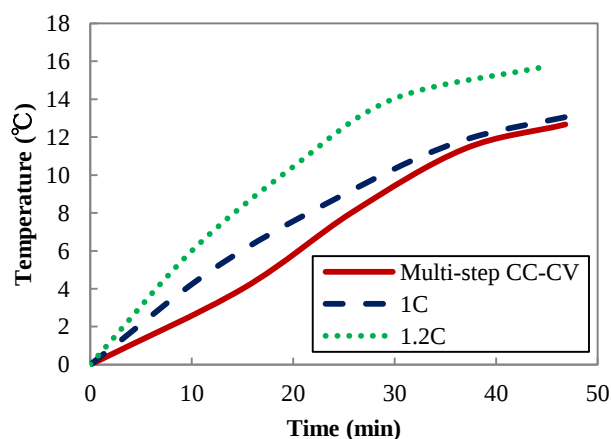


図 15 温度上昇の時間変化

可変速充電の温度上昇の変化に注目すると、途中で温度上昇が急になったり緩やかになったりする部分がある。これは充電電流を減少させるだけでなく、上昇もさせているためである。図 11 の概要図では従来の手法[4]として挙げられている、ある一定の温度上昇に応じて電流量を減少させることを示している。今後は新たな手法として、各 SOC や充電電流に応じた温度上昇特性の調査を行い、温度上昇抑制制御に応用する。

5. まとめ

熱回路モデルを用いた内部温度推定式を用いた内部温度推定システムを構築した。複数のパラメータを近似式やテーブル化したデータを用いて表現し、温度や電流、電圧の測定値と合わせて、内部温度の推定を実現している。

また、CC 充電の電流値を変速させる CC-CV 充電手法を採用した可変速充電器の構築を行った。結果として電流量 1CA で CC 充電を行った場合と比較すると、充電時間短縮とともに温度上昇抑制にも効果があった。

今後は、これらに冷却システムを加えた、より効果的な温度制御の最適化を行う充電システムの構築を目指す。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省・地域イノベーション戦略支援プログラム「地産地消型エネルギー源の要素技術である分散電源・熱源などの研究開発、および、スマートグリッドのコアとなる制御技術・装置の研究開発」の支援を得て実施した。

参考文献

- 1) C. Forgeza, D. Vinh Doa, G. Friedricha, M. Morcretteb, C. Delacourt, "Thermal modeling of a cylindrical LiFePO4/graphite lithium-ion battery," *Journal of Power Sources*, vol.195, pp.2961–2968, 2010
- 2) 黒崎, 佐藤, "伝熱工学," コロナ社, 東京, 2009 年 5 月.
- 3) 加藤, 山本, 林, 福井, "リチウムイオン蓄電池の熱特性解析モデルの構築と内部温度推定手法," 第 54 回電池討論会, 大阪国際会議場, 大阪, 2013 年 10 月.
- 4) 瀬川, 山本, 林, 福井, "低温動作を目的とした可変速充電システムの実装と評価," 電子情報通信学会 回路とシステム研究会(CAS), 熊本大学, 熊本, 2013 年 7 月.
- 5) C. Alaoui, "Solid-State Thermal Management for Lithium-Ion EV Batteries," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 1, Jan. 2013.