

卒業学位論文

倍電圧整流回路を利用した
リチウムイオンバッテリー用
セル選択式バランス回路

平成 30 年度

茨城大学 工学部

電気電子工学科

15T3011T 上野 瑛永

指導教員 鵜野 将年 准教授

要旨

リチウムイオン二次電池や電気二重層キャパシタなどの蓄電セルは、1セルあたりの電圧が低いため、複数個直列に接続することによって負荷の要求電圧を満たしている。各セルの個体差に起因したセル電圧のばらつきは、過充電及び過放電だけでなく加速度的な劣化を引き起こす恐れがある。そこで、セル電圧のばらつきを解消するためのセル電圧バランス回路が各種提案されている。

倍電圧整流回路を用いたセル電圧バランス回路は簡素な回路構成であるが、電力伝送を行うセルを任意に選択できないため、内部インピーダンスの高いリチウムイオン電池では電圧をバランスできず、大きな電圧偏差が残留する。また、任意の2セル間で電力伝送を行う従来のセル選択式バランス回路は、リチウムイオン電池に対して電圧ばらつきを解消可能であるものの、セルを選択するために複数のスイッチを必要とするため回路が複雑化してしまう。

本研究では、電力伝送を行うセルを選択するためのセル選択スイッチを倍電圧整流回路に組み込むことで、リチウムイオン電池の電圧ばらつきの解消及び、従来のセル選択式バランス回路に対してスイッチ数の削減が可能なセル電圧バランス回路を提案する。

Selective Cell Equalizer Using Voltage Multiplier for Lithium-Ion Batteries

Abstract

Energy storage cells such as lithium-ion batteries and double layer capacitors need to be connected in series to meet voltage requirement because a single cell voltage is low. The imbalance of cell voltage due to non-uniform individual cell characteristics may lead to overcharging or overdischarging, and accelerated deterioration of cells. Therefore, various kinds of cell voltage equalizers have been proposed for eliminating the voltage imbalance.

Although the cell voltage equalizer using voltage multiplier has a simple circuit configuration, this equalizer cannot arbitrarily select a cell to be power transmitted. Hence the voltage of the lithium-ion battery with high internal impedance cannot be balanced, and the voltage deviation remains large. Conventional selective cell voltage equalizers transfer the power between any two cells. Therefore, these equalizers can eliminate the voltage imbalance of the lithium-ion battery. However, the circuit configuration is complicated to be composed of dozens of switches.

This paper proposes a cell voltage equalizer using voltage multiplier incorporating cell selection switches to select a cell for power transmission. Proposed circuit can equalize the voltage of a lithium-ion battery, and reduce the number of switches compared with conventional selective cell equalizers.

目次

第1章 背景	1
1.1 電圧ばらつきによる悪影響	1
1.2 各種セル電圧バランス回路	2
1.3 基礎理論	4
1.4 従来回路	6
2章 提案回路	8
2.1 倍電圧整流回路を利用したセル選択式バランス回路	8
2.2 スイッチの制御方法	9
3章 動作解析	12
3.1 動作波形	12
3.2 周波数逡倍電流不連続モード	14
3.3 シミュレーション解析	15
4章 実機検証	17
4.1 回路製作	17
4.2 セル電圧バランス実験	20
5章 まとめと今後の予定	21

第 1 章 背景

1.1 電圧ばらつきによる悪影響

リチウムイオン二次電池や電気二重層キャパシタ（EDLC）などの蓄電セルは、電気自動車や発電設備の蓄電システムとして様々な用途で用いられる。蓄電セルは 1 セルあたりの起電力が低いため（リチウムイオン電池は 2.7~4.2 V, EDLC は 0~2.5 V）、複数の蓄電セルを直列に接続してバッテリストリングを形成することにより負荷の要求電圧を満たしている。しかし、容量や内部インピーダンス、自己放電率などの個体差により、バッテリストリング内でセル電圧にばらつきが生じる。図 1.1 に示すようにセル電圧がばらついた状態での充放電は利用可能エネルギーを低下させるだけでなく、最悪の場合、電圧が最大（最小）のセルが過充電（過放電）状態となりセルの早期劣化を引き起こす恐れがある。したがって、過充電や過放電及び利用可能エネルギーの低下を引き起こす電圧ばらつきを解消することを目的として、様々な方式のセル電圧バランス回路が提案されている。

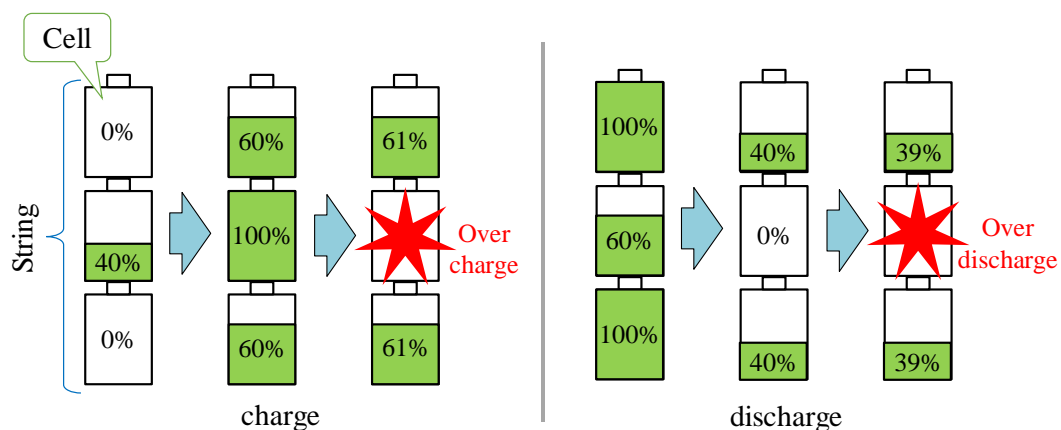


図 1.1 セル電圧ばらつきによる過充電と過放電

1.2 各種セル電圧バランス回路

セル電圧バランス回路の方式は損失型と非損失型に大別される。図 1.2 に示す損失型では、電圧が高いセルのエネルギーを抵抗で消費してセル電圧をバランスさせる。回路構成は簡素であるものの、セルのエネルギーを抵抗で消費し熱として捨てるため効率が悪く、発熱も問題となる。非損失型は、セル to セル方式とストリング to セル方式に大別される。エネルギーを抵抗で消費させる損失型に対して、非損失型では単セルまたは複数個のセルから電圧の低いセルへとエネルギーの再分配を行うことでセル電圧をバランスさせるため、エネルギー損失が少ないという特徴がある。

図 1.3 のセル to セル方式では、セル数に応じてセル選択スイッチを追加接続することで任意のセル数に対応可能な優れた拡張性を持つが、電力伝送を行うために 1 個のセルにつき複数個のセル選択スイッチが必要となる。スイッチは駆動するためにゲートドライバを含む 5~10 個程度の素子が必要となるため、使用するスイッチ数が多いほど回路が複雑化及び大型化してしまう。

図 1.4 に示すストリング to セル方式では、セル数によらず数個のスイッチで構成可能なため回路構成が簡素である[1]。しかし、電力伝送を行うセルを任意に選ぶことができず、内部インピーダンスの高いリチウムイオン電池を用いたバッテリーストリングでは、セル電圧をバランスすることができずに大きな電圧偏差が残る。

本研究では、簡素な回路構成の倍電圧整流回路を用いたセル電圧バランス回路に、電力伝送先のセルを選択するためのセル選択スイッチを組み込んだセル電圧バランス回路を提案する。提案回路は、リチウムイオン電池の電圧ばらつきの解消及び、従来のセル to セル方式に対してスイッチ数を削減することを目的とする。

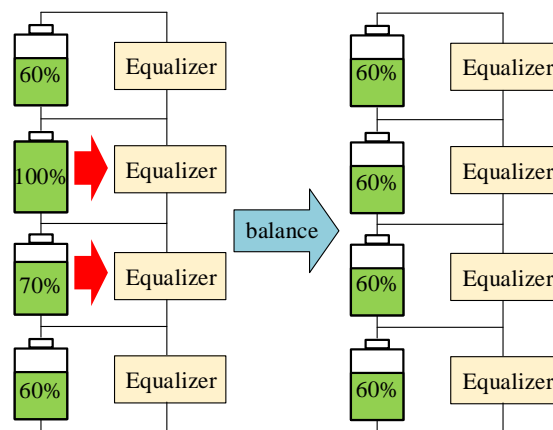


図 1.2 損失型

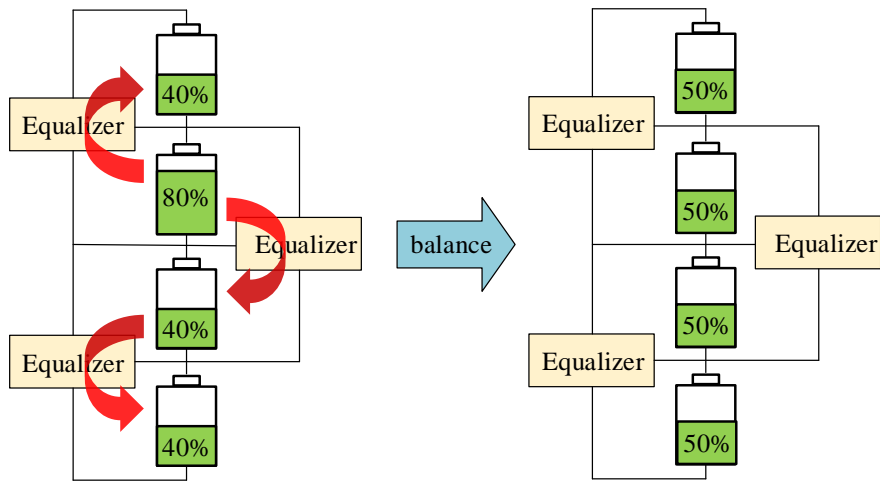


図 1.3 隣接セル間方式

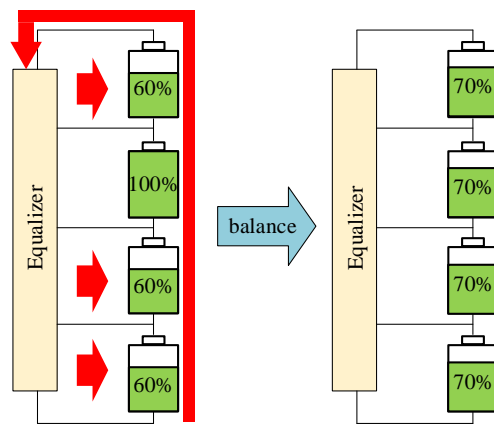


図 1.4 スtring to セル方式

1.3 基礎理論

1.3.1 共振回路

図 1.5 に示すようなインダクタ L とコンデンサ C を直列接続した回路は LC 直列共振回路と呼ばれる。抵抗を R 、角周波数を ω とすると回路のインピーダンス Z は

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (1.1)$$

(1.1)式において虚数部がゼロとなる角周波数を ω_0 とすると、

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0 \quad (1.2)$$

(1.2)式を ω_0 について解くと ω_0 は、

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.3)$$

角周波数 ω は周波数 f を用いて $\omega=2\pi f$ と書けるので、共振周波数 f_r は(1.4)式で表される。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.4)$$

よって、周波数 f が(1.4)式となる場合は、(1.1)式の虚部が消去されて抵抗 R のみで表される。

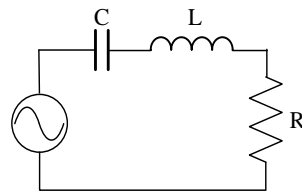


図 1.5 LC 直列共振回路

1.3.2 倍電圧整流回路

倍電圧整流回路の動作を図 1.6(a)、(b)に示す。倍電圧整流回路は交流を印加することにより駆動する。印加する交流の振幅を V とする。図 1.6(a)は負の電圧 V が印加されており、ダイオード D_L が導通するとともにコンデンサ C に電流が流れ、コンデンサの電圧は V となる。図 1.6(b)は正の電圧 V が印加されており、ダイオード D_H が導通すると入力電圧とコンデンサの電圧を合わせた $2V$ の電圧が負荷に出力される。

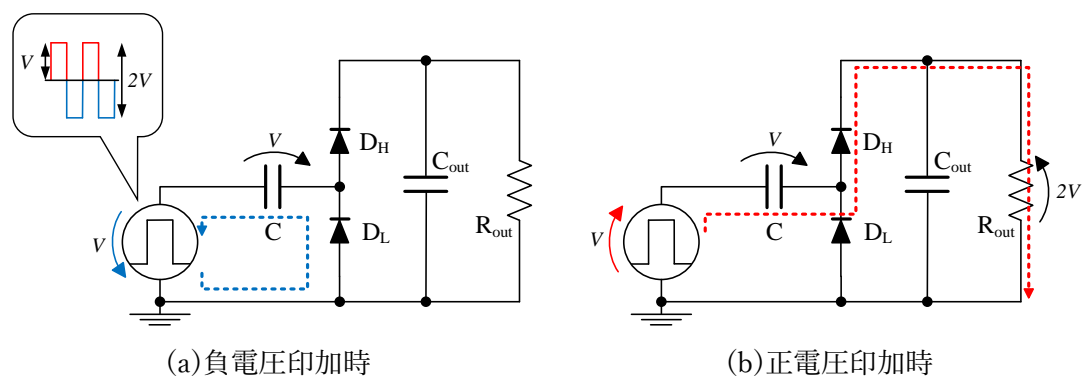


図 1.6 倍電圧整流回路

1.3 従来回路

1.3.1 倍電圧整流回路を利用したバランス回路

図 1.7 に示すストリング to セル方式の従来回路は、LC 共振インバータと倍電圧整流回路から構成される。回路には入力としてストリング電圧 V_{String} が印加されており、スイッチ Q_H と Q_L を 50% のデューティで駆動することで矩形波電圧を生成する。LC 共振回路に矩形波が印加されることにより交流が生じ、トランスを介して 1 次側の倍電圧回路に入力される。倍電圧整流回路は交流によって駆動し、無制御で最低電圧のセルへ電力伝送を行う。しかし、図 1.8 に示すように回路から見た各セルの電圧 V_{Cell} は、内部インピーダンスによる電圧降下 V_Z の分だけ充電時は電圧が高く出力される。電圧の低いセルに優先的に電流が流れ込む本方式において、内部インピーダンスが低く V_Z による電圧変動の影響が小さい EDLC では、電圧ばらつきを解消可能であることが実機検証により確認されている。しかし、内部インピーダンスの高いリチウムイオン電池は V_Z の影響を大きく受け、電圧ばらつきに大きな偏差を残すためセル電圧をバランス出来ない。

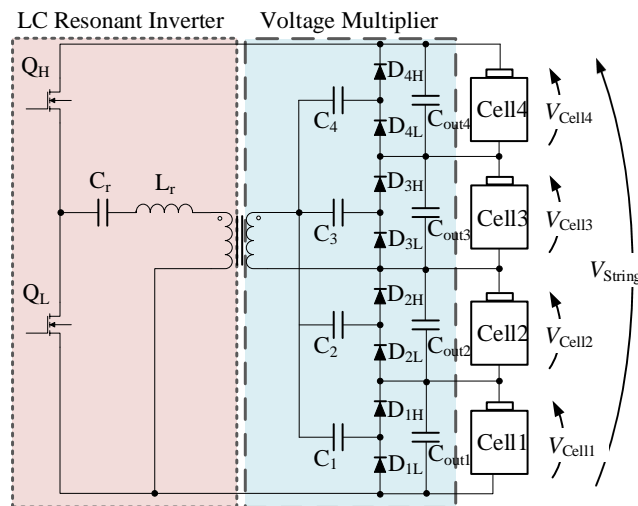


図 1.7 従来回路 (ストリング to セル)

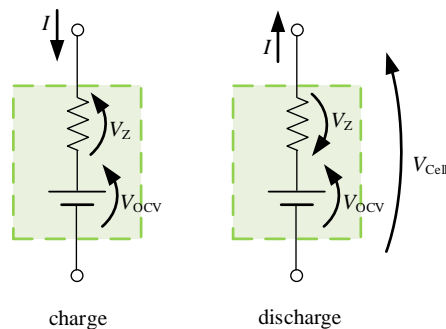


図 1.8 充放電時のセル電圧

1.3.2 セル to セル方式 (セル選択方式)

図 1.9 に示す回路は、スイッチ $S_{in1} \sim S_{inz+1}$ によって最大電圧のセルを、 $S_{out1} \sim S_{outz+1}$ によって最小電圧のセルを選択し、スイッチで選択された 2 セル間で電力授受を行うセル to セル方式のセル電圧バランス回路である[2]。コンバータの両端に接続された 8 個のスイッチ ($S_{in(even)}, S_{in(odd)}, S_{out(even)}, S_{out(odd)}$) は、2 セル間で電力伝送を行う際にコンバータの入力と出力の電圧極性を一致させるためのものである。セル to セル方式では、セル選択スイッチを用いて任意のセルに電力伝送を行うことができる。従って、開放電圧 V_{OCV} が最低のセルに対して電力伝送を行うことで、内部インピーダンスの大きいリチウムイオン電池に対して電圧バランスを行うことが可能である。しかし、1 個のセルにつき複数のスイッチが必要であり、図 1.9 の回路構成では n 個のセルに対してスイッチの数は $2n+10$ 個必要となる。

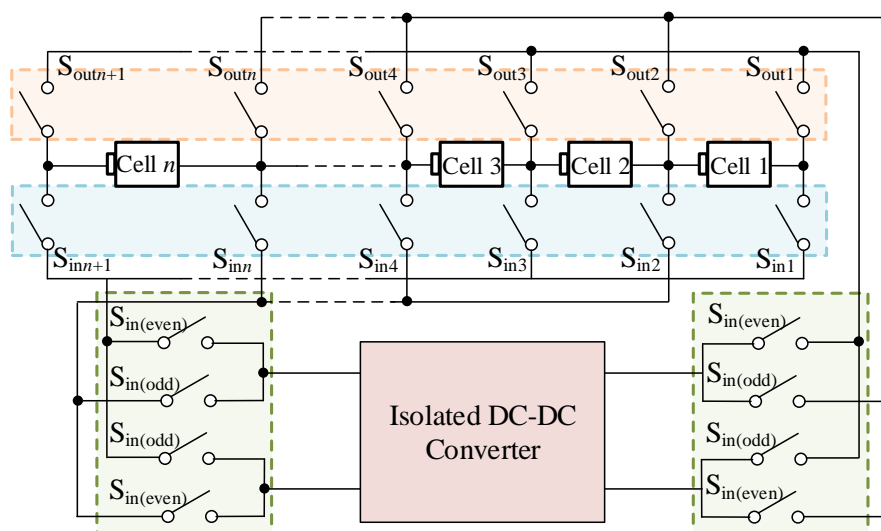


図 1.9 従来回路 (セル to セル方式)

第2章 提案回路

2.1 倍電圧整流回路を利用したセル選択式バランス回路

本研究で提案する倍電圧整流回路を利用したセル選択式バランス回路を図 2.1 に示す。提案回路は、図 1.7 に示した従来回路の 2 次側の倍電圧整流回路にセル選択スイッチを組み込むことで、各セルの開放電圧 V_{OCV} に合わせて電力伝送先のセルを選択する。セル選択スイッチが適切に動作すると、開放電圧 V_{OCV} が最も低いセルに電力伝送を行うため、従来のストリング to セル方式で電圧バランス不可能なリチウムイオン電池に対してセル電圧をバランスすることが可能である。

また、1セルにつき1つのセル選択スイッチのみで任意のセルに対して電力伝送を行うことができるため、 n セルに対して n 個のスイッチ数で構成される。従って、図 1.9 に示すセル to セル方式に対してスイッチ数を概ね半減可能である。

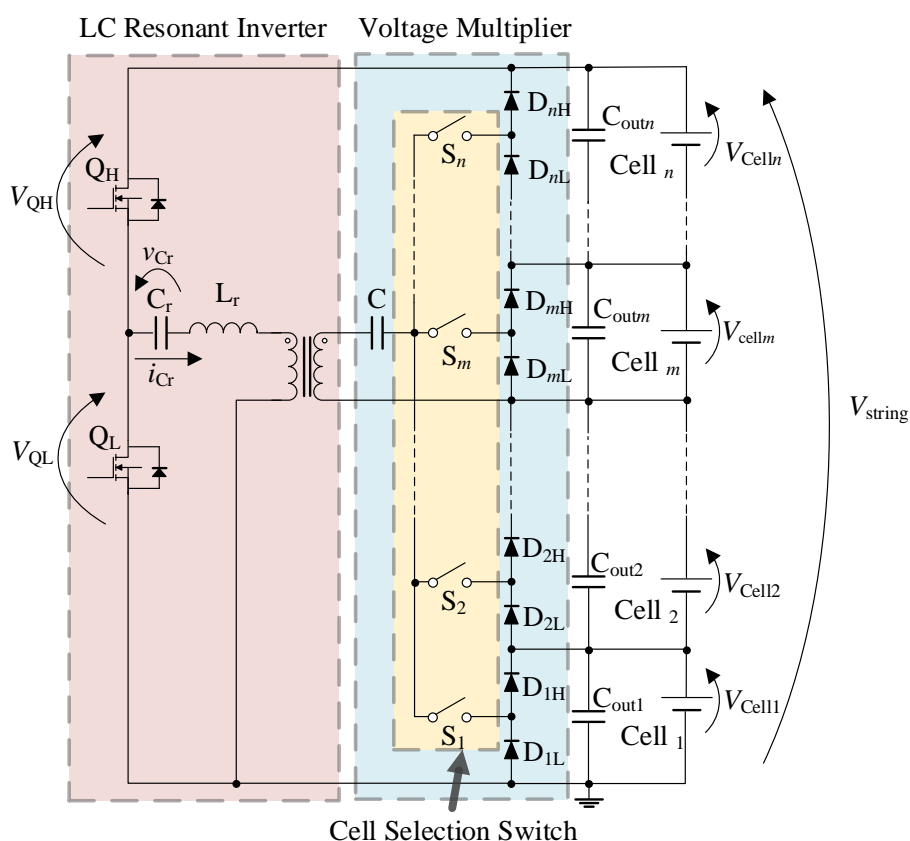


図 2.1 提案回路

2.2 スイッチの制御方法

スイッチ制御のフローチャートを図 2.2 に示す。始めに全てのセル電圧を計測し、計測値の中からセルの最大電圧 V_{\max} および最小電圧 V_{\min} を検出する。 V_{\max} と V_{\min} の差が 0.02 V 以上である場合、最小電圧のセルを充電するようにセル選択スイッチを ON し、提案回路を動作させる。ストリングと最低電圧のセル間で電力伝送が行われ、一定期間が経過すると回路動作を停止し、全セル選択スイッチを OFF にして電力伝送を停止する。そしてフローチャートの始めに戻り、再び各セル電圧の測定を行う。また、 V_{\max} と V_{\min} の差が 0.02 V 以下の場合には電圧ばらつきが十分小さいと判断し、セル選択スイッチおよびインバータのスイッチを OFF のまま電力伝送は行わずにフローチャートの始めに戻る。制御のフローチャートに基づいた以上の手順を繰り返し行うことにより、各セルの電圧ばらつきを解消することができる。4セル用の制御プログラムを以下に示す

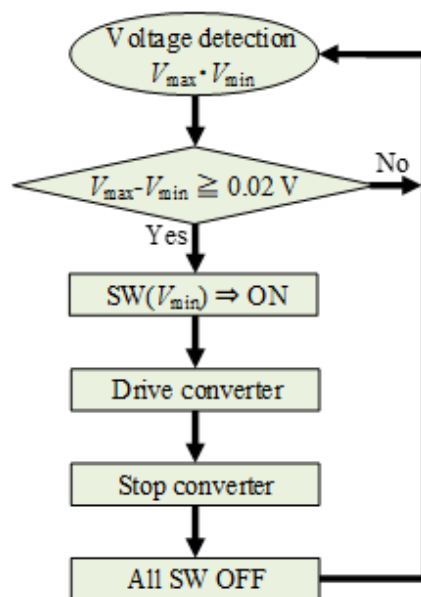


図 2.2 スイッチ制御のフローチャート

制御プログラム

```
double a[4]={x1,x2,x3,x4};
double max;
double min;
int i;
static int Y1=0;
static int Y2=0;
static int Y3=0;
static int Y4=0;
static int on=0;
static int off=0;
static double d=0;
static int count=0;count++;

//検出したセル電圧から電圧セルと最小電圧セルを求める//
max=a[0];
min=a[0];
for(i=0;i<=3;i++) {
    if(a[i]>max) {
        max=a[i];
    }
    if(a[i]<min) {
        min=a[i];
    }
}

if(count==2) {
    if(max-min<=0.02) {//セルの最大電圧と最小電圧の差が 0.02V 以下ならば現状維持
        count=600;
    }
}

if(count==3) {//最小電圧のセルに電力伝送を行うセル選択スイッチを ON
    if(min==a[0]){
        Y1=1;Y2=0;Y3=0;Y4=0;
    }
    else if(min==a[1]){
        Y1=0;Y2=1;Y3=0;Y4=0;
    }
    else if(min==a[2]){
        Y1=0;Y2=0;Y3=1;Y4=0;
    }
    else if(min==a[3]){
        Y1=0;Y2=0;Y3=0;Y4=1;
    }
}

if(count==4) {//回路動作を開始
    on=1;
    off=0;
}

if(count==5) {//セルの最大電圧と最小電圧の差の大きさに応じて充電時間を調節
    if(max-min<=0.5) {
        count=100;
    }
    if(max-min<=0.3) {
        count=250;
    }
    if(max-min<=0.1) {
        count=400;
    }
}
```

```
if(count==545) { //回路を停止
    on=0;
    off=1;
}

if(count==550) { //全てのセル選択スイッチを OFF
    Y1=0;Y2=0;Y3=0;Y4=0;
}

if(count==560) { //プログラムの初期状態に戻る
    count=0;
}

if(count==700) {
    count=0;
}

y1=Y1;
y2=Y2;
y3=Y3;
y4=Y4;
y5=on;
y6=off;
y7=count;
```

第3章 動作解析

3.1 動作波形

倍電圧整流回路が駆動する条件として、セル電圧以上の peak-to-peak を持つ交流電圧を倍電圧整流回路に印加する必要がある。トランス巻数比を $N:1$ 、バランス時のセル電圧を V_{Cell} 、ストリング電圧を V_{string} 、ダイオード順方向電圧を V_D とすると動作条件は(3.1)式で表される。

$$\frac{V_{string}}{N} > V_{Cell} + 2V_D \quad (3.1)$$

4直列のストリングにおいて各セルの電圧を 4.2 V でバランスさせるとし、ダイオードの順方向電圧を 0.6 V とした場合、倍電圧整流回路を駆動するためには巻数比は (3.2) 式の条件を満たすように設計しなければならない。

$$N < \frac{16.8}{4.2 + 2 \times 0.6} \approx 3.1 \quad (3.2)$$

よって、本稿では (3.2) 式で示される条件を満たすように、提案回路の巻数比 N を 2 とし回路設計を行った。

$Cell_1$ を最低電圧のセルとした場合の提案回路の動作波形を図 3.1 に示す。スイッチのドレイン-ソース電圧 v_{QH} 、 v_{QL} 、共振コンデンサ C_r の電流を i_{Cr} 、電圧を v_{Cr} とする。倍電圧整流回路は周波数逡倍電流不連続モードで動作させ、共振コンデンサに流れる電流の方向から 6 つの Mode に分けることができる。周波数逡倍電流不連続モード及び各電流モードについて下記で説明する。各動作 Mode における電流経路を図 3.2 に示す。

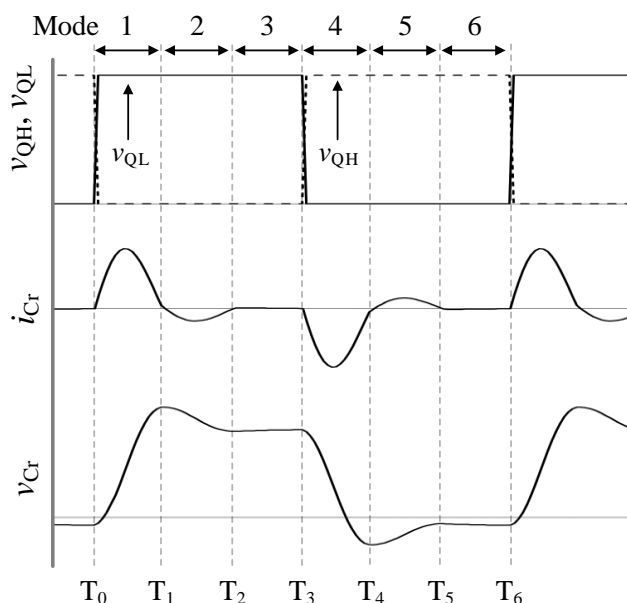
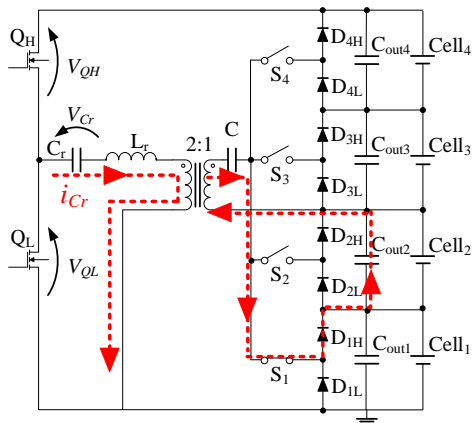
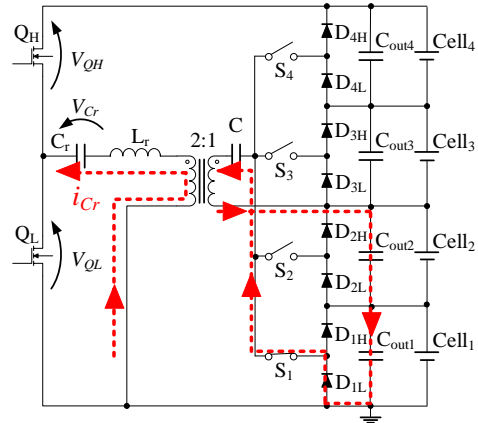


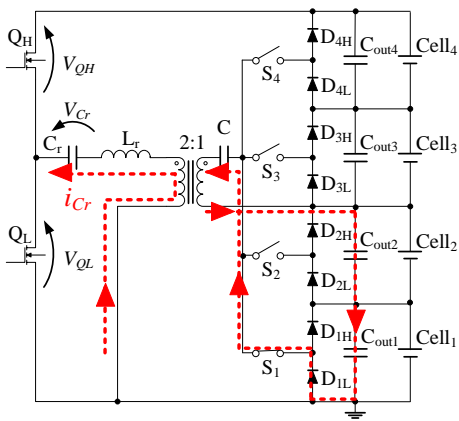
図 3.1 理論動作波形



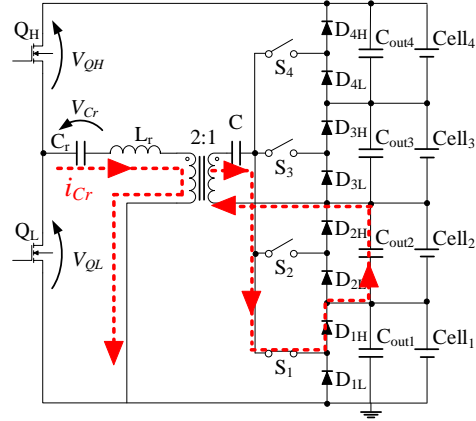
Mode 1



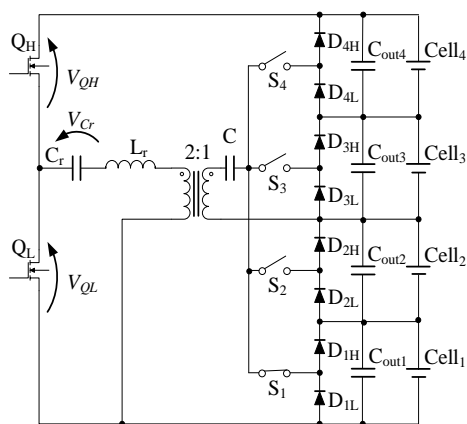
Mode 4



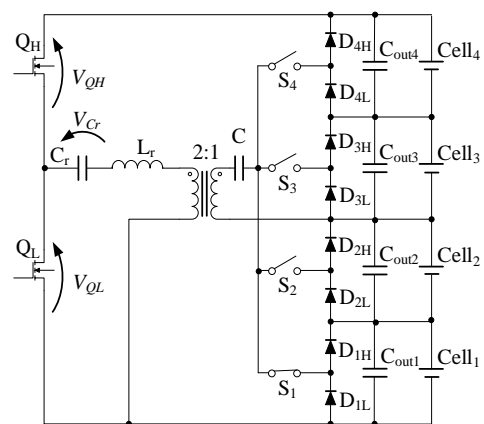
Mode 2



Mode 5



Mode 3



Mode 6

图 3.2 電流経路

Mode 1 ($T_0 < t < T_1$)

Q_H が ON されると、 i_{Cr} が正の向きに流れ始め v_{Cr} が増加する。トランスの 2 側には、巻き数比 2:1 に応じて 1 次側の 2 倍の電流が 2 次側に流れる。2 次側では、スイッチ S_1 が ON されており D_{IH} が導通して C_{OUT2} を放電する向きに電流が流れる。

Mode 2 ($T_1 < t < T_2$)

i_{Cr} が負の向きに流れ v_{Cr} が減少する。2 次側では、 D_{IL} が導通して C_{OUT1}, C_{OUT2} を充電する向きに電流が流れる。 i_{Cr} が 0 に達し、 v_{Cr} が一定になると Mode3 へ移行する。

Mode 3 ($T_2 < t < T_3$)

Mode3 では、1 次側の LC 共振回路及び、2 次側の倍電圧整流回路に電流は流れず電力伝送は行われない。 Q_H を OFF すると Mode4 へ移行する。

Mode 4 ($T_3 < t < T_4$)

Q_L が ON されると、 i_{Cr} は正の向きに流れ v_{Cr} が減少する。二次側では、 D_{IL} が導通して C_{OUT1}, C_{OUT2} を充電する向きに電流が流れる。

Mode 5 ($T_4 < t < T_5$)

i_{Cr} が負の向きに流れ v_{Cr} が増加する。二次側では、 D_{IH} が導通して C_{OUT2} を放電する向きに電流が流れる。 i_{Cr} が 0 に達し、 v_{Cr} が一定になると Mode6 へ移行する。

Mode 6 ($T_5 < t < T_6$)

Mode6 は、Mode3 と同様に電力伝送が行われないモードである。 Q_L を OFF すると、再び Mode1 に移行する。

3.2 周波数逡倍電流不連続モード

1 回のスイッチング周期間に共振周期が偶数回含まれるようにインダクタ L とコンデンサ C を調節し、共振周波数を設定することで図 3.1 での Mode 3, 6 のような電流が流れない期間を設ける。倍電圧整流回路は電流不連続モードで動作させると、負荷に対して定電流を供給する特性を持つ。つまり、LC 共振タンクを適切に設計することでバランス電流を定電流化する。

3.3 シミュレーション解析

提案回路の有効性を検証するために、シミュレーションソフト PSIM を用いて解析を行った。PSIM での回路構成を図 3.3 に示す。各セルには容量 10 mF のコンデンサと内部抵抗として 5 mΩ の抵抗を使用し、セル電圧 $V_{Cell1} \sim V_{Cell4}$ を 1.0~2.5 V の範囲でばらつかせた。各素子の値は $C_r = 100$ nF、 $L_r = 2.62$ μF、 $L_{mg} = 76.4$ μF、 $C = 70$ μF、トランスの巻き線比は 2:1 とした。定電流を出力するために共振周波数はスイッチング周波数の 1 倍よりも高い値にする必要があり、共振周波数は 311 kHz、スイッチング周波数は 100 kHz とした。

シミュレーション解析の結果を図 3.4 に示す。セル電圧 V_{max} と V_{min} の差が 0.02 V 以上ある場合は V_{min} のセルへ電力伝送を行うため、シミュレーション開始直後から 0.04 s 程度経過するまでは Cell1 が他のセルからエネルギーを受け取っていることが確認できる。Cell1 が充電され、 V_{Cell1} が V_{Cell2} を超えると Cell2 へ電力伝送を行う。Cell2 が充電され、再び V_{Cell1} が最小電圧になると Cell1 へ電力伝送を行う。このように最小電圧セルへ電力伝送を行う動作が、他の Cell3、Cell4 に対しても同様に V_{max} と V_{min} の差が 0.02 V 以下になるまで実行される。最終的にすべてのセル電圧のばらつきは 0.02 V 以内に収まり、提案回路の有効性が示された。

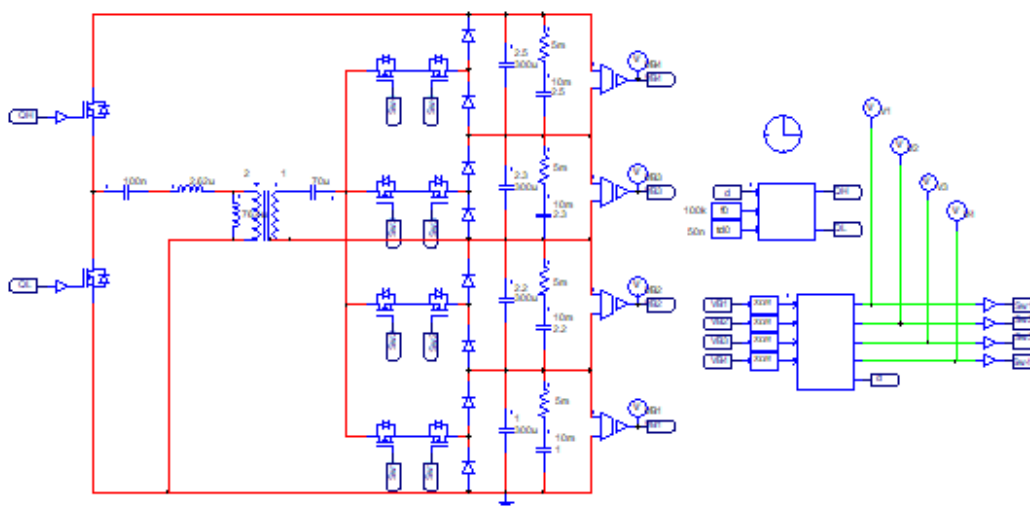


図 3.3 PSIM 上の回路構成

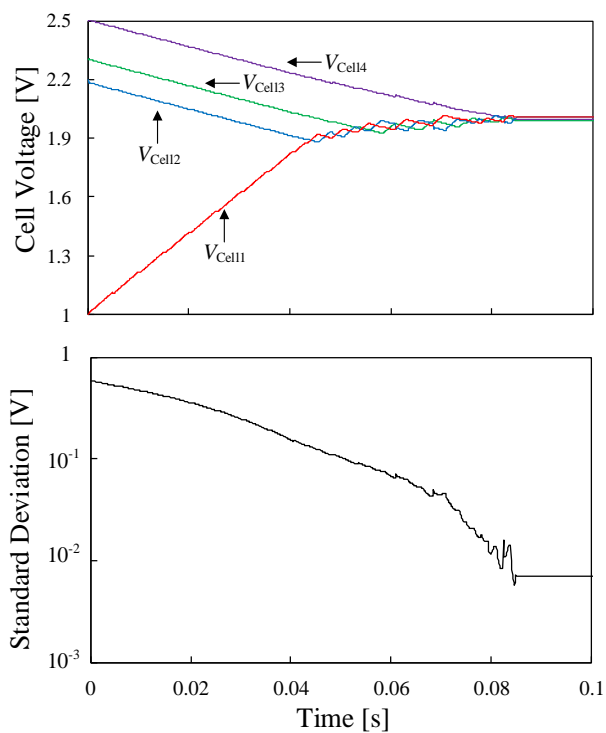


図 3.4 電圧バランスのシミュレーションにおけるセル電圧と標準偏差

第4章 実機検証

4.1 回路製作

基板設計 CAD ソフト Eagle を用いて提案回路の設計を行った。Eagle による回路設計図の schematic と board を図 4.1 と図 4.2(a)、(b)に示す。また、プリント基板に素子を実装した提案回路の試作機を図 4.3(a)、(b)に、試作回路で使った素子を表 4.1 に示す。提案回路を動作させるために外部からマイコンを接続してスイッチの制御を行うが、マイコンの定格入力電圧は 3.3 V であり、これを超える電圧をマイコンに入力すると故障する恐れがある。4 個の EDLC が直列接続されたバッテリーリングでは電位が最大で 10 V となるため、セル電圧の計測を行う際にマイコンの定格入力電圧を超過してしまう。よって、差動アンプ (LT1990CS8#PBF) を使用して個々のセル電圧を測定した。

試作機の動作波形を図 4.4 に示す。 i_{Cr} の動作波形は図 3.1 の理論波形と良い一致を示したことから、試作機が周波数逡倍電流不連続モードで動作していることを確認した。

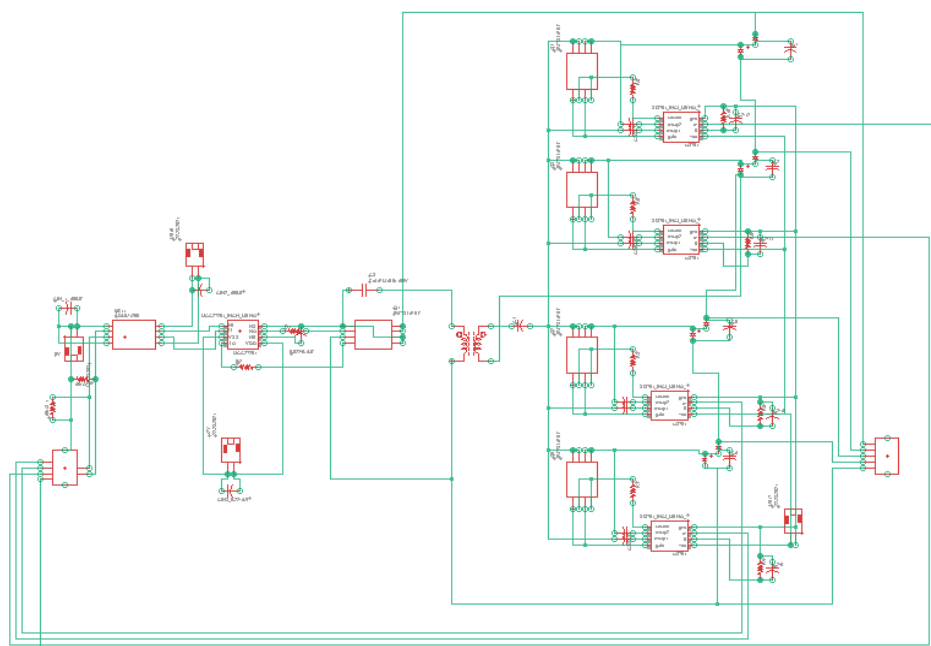
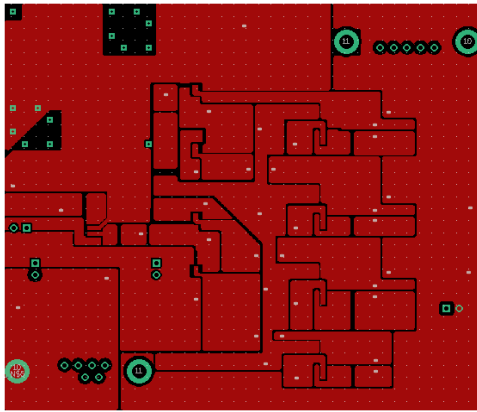
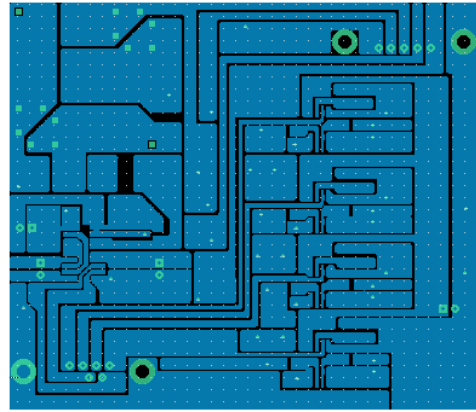


図 4.1 Eagle による回路設計図(Schematic)

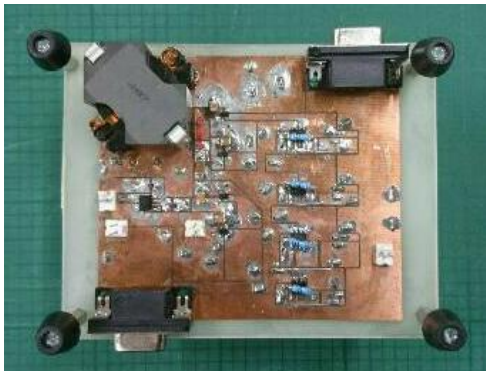


(a)表面

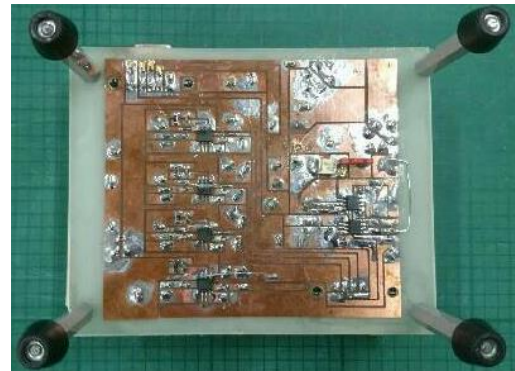


(b)裏面

図 4.2 Eagle による回路設計図(board)



(a)表面



(b)裏面

図 4.3 提案回路の試作機

表 4.1 提案回路の素子表

Items	Values
C_r	Film capacitor, 100 nF
C	Ceramic capacitor, 100 μ F
$C_{out1}-C_{out4}$	Ceramic capacitor, 440 μ F
$D_{1H}-D_{4H}$, $D_{1L}-D_{4L}$	Schottky barrier diode, $V_f = 0.35$ V
MOS FET	IRF7341
Gate Driver	UCC27201/ Si8751
Transformer	$N1:N2=2:1$, $L_{kg}=2.62$ μ H, $L_{mg}=76.4$ μ H

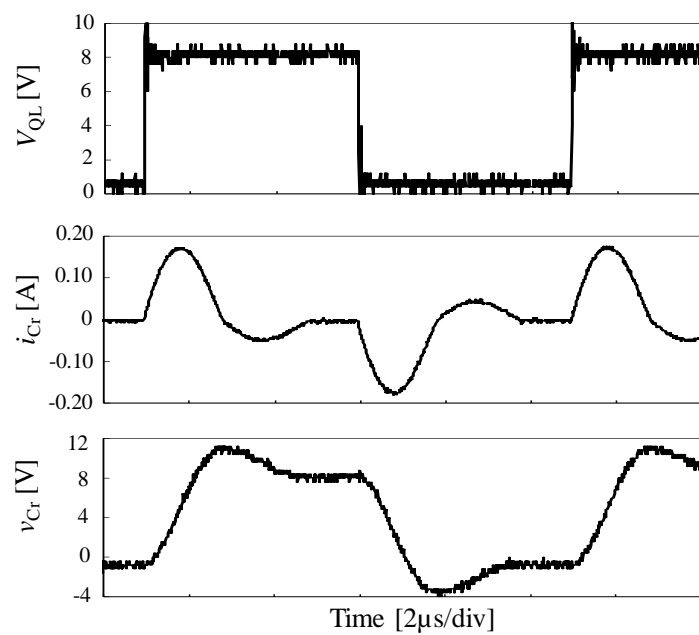


図 4.4 動作波形

4.2 セル電圧バランス実験

実験系を図 4.5 に示す。実験では、容量 400 F で定格 2.5 V の EDLC を 4 個使用し、各セル電圧を 1.0~2.5 V の範囲で意図的にばらつかせた状態からバランス実験を行った。

実験から得たバランス特性及び標準偏差を図 4.6 に示す。最小電圧セルに電力伝送が行われている期間、電力伝送を行ったセル電圧は低下し、電力を受け取ったセル電圧は上昇した。この結果より、セル選択スイッチの動作が正常に行われ、バッテリーストリングから最小電圧のセルに対して電力伝送が行われていることが確認できた。時間経過とともに各セルの電圧ばらつきは解消され、標準偏差は最終的に 10 mV 以下となり、提案回路はセル電圧のバランス能力を有することが示された。

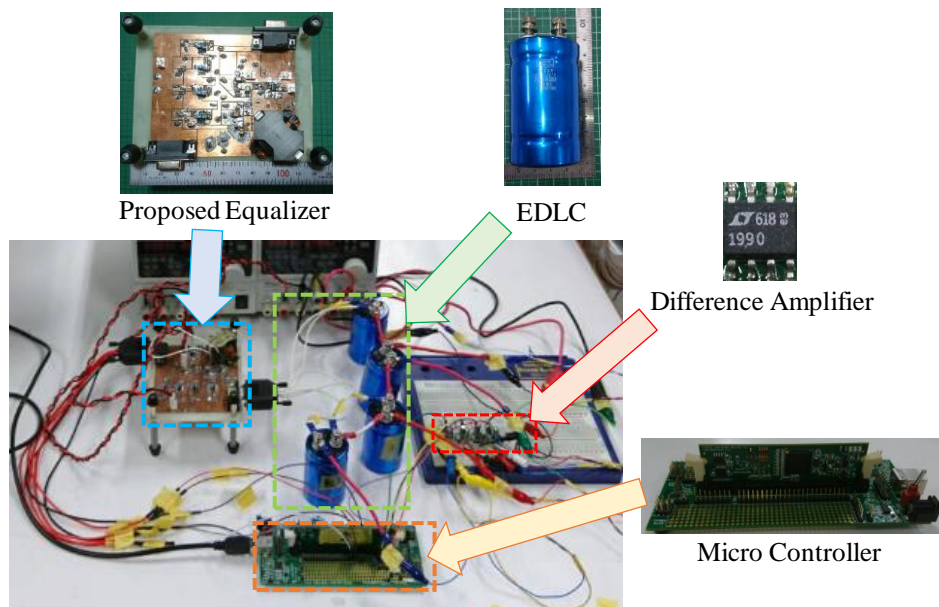


図 4.5 実験系

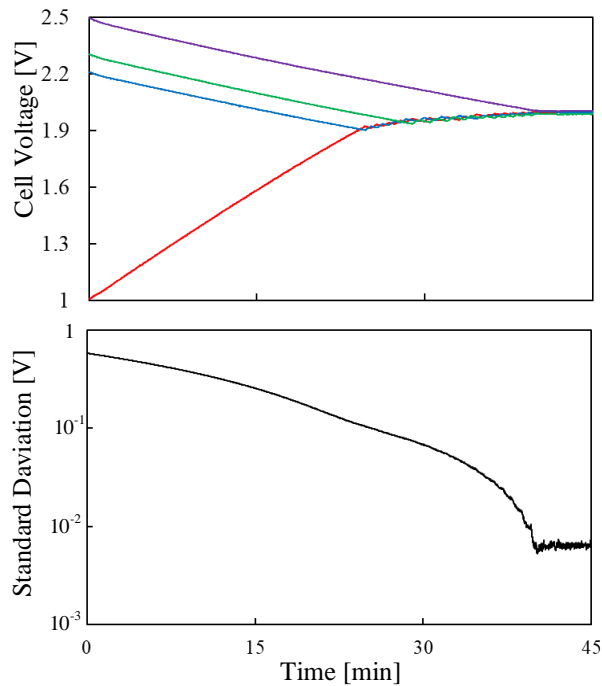


図 4.6 バランス特性及び標準偏差

第 5 章 まとめと今後の予定

本稿で提案したセル電圧バランス回路は、倍電圧整流回路を用いたバランス回路にセル選択スイッチを組み込んだ回路構成である。従って、リチウムイオン電池の電圧バランス及び従来のセル to セル方式のバランス回路に対してスイッチ数を概ね半減することができる。

提案回路における電圧バランス機能の有効性を実証するために、スイッチを制御するプログラムを作成し、シミュレーションによる回路の動作解析を行った。解析により、回路が所望の動作を行うことを確認した後、提案回路を試作した。4 個直列接続された EDLC に対して試作回路を用いたバランス実験を行った結果、時間経過と共にセル電圧のばらつきが解消されたことから提案回路の有効性が示された。

今後は、リチウムイオン電池に対するセル電圧バランス実験を行う予定である。

参考文献

- [1] Uno, M. and Tanaka, K.: Double-switch single-transformer cell voltage equalizer using a half-bridge inverter and voltage multiplier for series-connected supercapacitors, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 9, pp. 3920–3930, Nov. 2012.
- [2] Uno, M., Yoshino, K., and Hasegawa, K.: Direct Cell-to-Cell Voltage Equalizer Using Capacitively-Isolated Parallel-Resonant Converter for Series-Connected Energy Storage Cells, in Proc. PEMC Aug. 2018, pp. 94-100.

謝辞

本研究を進めるにあたり、熱心なご指導を頂いた鶴野将年准教授に深く感謝致します。また、研究室の皆様にも多くの助言を頂きました。特に、長谷川航輝先輩、吉野功司先輩には研究に対する助言や論文の添削など、大変多くのお力添えを賜りました。ここに皆様に感謝の意を表し、謝辞に代えさせていただきます。