

電気二重層キャパシタ充電回路の制御

穂高一条¹⁾・永松和也²⁾

Charge control of electric double layer capacitors

Ichijo HODAKA, Kazuya NAGAMATSU

Abstract: Photovoltaic cells are paid attention to as clean and inexhaustible energy sources. However, power of photovoltaic cells is affected by solar radiation, and solar batteries themselves do not store electric energy. It is a general method to store electric energy generated by photovoltaic cells temporarily in storage batteries. At this time, when the storage battery is discharged, it is desirable to take out the electrical energy of photovoltaic cells. As a solution, it is possible to connect electric double layer capacitors between photovoltaic cells and storage batteries. However, it is necessary not only to connect electric double layer capacitors but also to control a circuit for charging appropriately. This study focuses on control of circuit for charging from photovoltaic cells to electric double layer capacitors. Concretely speaking, the purpose of this study is to propose a method of controlling the charge process to electric double layer capacitors by using SEPIC circuit with microcontrollers.

Key words: Photovoltaic cells, Electric double layer capacitors, Charge, Microcontrollers, SEPIC circuit

1. はじめに

太陽電池はクリーンで無尽蔵のエネルギー源として注目されている。しかし太陽電池の出力は日射量による変動が非常に大きく、太陽電池自体に蓄電機能はないため、太陽電池の電力を一時的に蓄電池に溜める方法が一般的に活用されている。

太陽電池は材料物理的な改善がない限りそれ自身の高効率化は期待できない。そこで比較的小規模、低コストな発電システム用として、マイクロコントローラとスイッチング素子による簡素な制御システムでセンサーと出力安定などの機能を実現し、太陽電池の充電の効率を最適化するシステムを構築することが目標とされている。

また太陽電池から蓄電池に充電する際、損失を少なくし、蓄電池が放電している時にも無駄なく太陽電池から蓄電池に充電したい。この方法として、太陽電池と蓄電池の間に電気二重層キャパシタを接続するというものが考えられる。そしてこの方法についてはまだ研究の余地がある。本研究では、太陽電池から電気二重層キャパシタへの充電に焦点を置き、太陽電池を入力とした SEPIC 回路にマイコンを繋ぎ、MOSFET を

自動動作させる信号を送り出力を制御して、電気二重層キャパシタに充電することを目的とする。また比較回路として SEPIC 回路に既存のバッテリー・チャージャを取り付けた回路を用いて比較検討した。

2. SEPIC 回路

SEPIC(Single Ended Primary Inductance Converter) コンバータは、ステップアップコンバータの中間にコンデンサを入れて、出力電圧範囲を変更することで降圧も可能にしている。また、入力電圧の変化に対して常に一定の出力電圧を得ることができる。SEPIC 回路は標準的なポータブルシステムに適した回路なので、携帯機器で電池寿命をのばす必要性から要求が高まっている。SEPIC 回路の回路図を図 1 に示す。

SEPIC 回路は、電池 2, 3 セルで動作するステップダウンまたはステップアップコンバータに比べて多くの部品を必要とする。しかし、SEPIC 構成の回路にすることで増える部品のコストは、電池のセル数を減らせることで、たいいてい場合は相殺できる。

図 1 の回路において MOSFET が ON になったとき電流 I_1 は、入力電圧源からインダクタ L_1 を通って共通ライン側に流れる。同様に電流 I_2 は、電圧源とみ

¹⁾電気電子工学科准教授

²⁾電気電子工学科科学部生

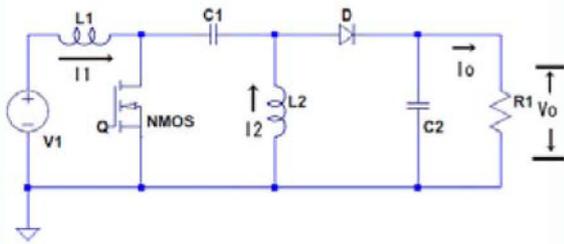


図 1: SEPIC 回路

なされるコンデンサ C_1 からインダクタ L_2 を通って共通ライン側へと、図の矢印の向きに流れる。こうして電流が増大する。

MOSFET が OFF になると、 I_1 はコンデンサ C_1 とダイオードを通してコンデンサ C_2 と負荷 R_1 に流れる。 I_2 は、ダイオードを通して C_2 に流れる。二つの電流は、コンデンサのチャージに合わせて傾斜的に下がる。そして電流 I_o はコンデンサ C_2 から負荷 R_1 に向かって流れる。[1]

3. マイコン

マイコンはコンピュータシステムをひとつの集積回路に組み込んだものである。そして電子機器の制御用に最適化されていて、現在私たちの使っている電子機器や家電製品などのほとんどに組み込まれている。マイコンの主な部品は CPU コア、プログラムを格納するメモリ、タイマー、外部周辺機器などと通信するための入出力部である。[2]

マイコンには PWM 制御という機能がある。PWM 制御とはパルス幅変調 (Pulse Width Modulation) の略で、パルス幅の ON, OFF の時間比率を変化させて出力電圧を制御することである。これは MOSFET の特性を活かした制御方法である。[3]

またこのときの ON の時間の割合のことをデューティ比と言う。デューティ比を d とすると

$$d = \frac{\tau}{T} \quad (1)$$

となる。 τ は ON の時間を T はスイッチング周期を表している。

4. 太陽電池による電気二重層キャパシタ充電回路

実験で使用する太陽電池の開放電圧を測定してみると、

- 晴れ …… 1.6 [V]

- 曇り …… 1.3 [V]
- 蛍光灯 …… 0.6 [V]

という結果が得られた。

実験ではこの太陽電池 4 つを直列に接続したものを入力として使用する。太陽電池 4 つを直列にした時の開放電圧は 6.08 [V] であった。

そして充電用の電気二重層キャパシタには容量 1 [F]、内部抵抗 30 [Ω]、定格 5.5 [V] を使用する。また、充電後に次の実験ができるように電気二重層キャパシタに放電回路を直列に接続した。放電回路は抵抗 220 [Ω] を 5 個並列に接続したもの (合成抵抗 44 [Ω]) にスイッチを接続したものをを使用した。

本研究ではマイコンの PWM 制御でデューティ比を変化させ、MOSFET のスイッチング機能によって SEPIC 回路の出力を制御する。図 2 に本実験装置の概要を示す。

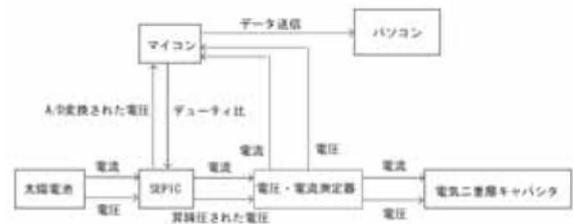


図 2: 実験装置の概要

回路の制御に使用するマイコンは NEC V850ESKG2 を用いた。このマイコンにはインターバルタイマ機能、ポート入出力機能、PWM 出力機能、A/D コンバータ機能、シリアル通信機能があり本実験に適した動作ができると考えこれに決めた。

しかしマイコンの A/D コンバータは電圧を測定することができるが、電流を測定することはできない。そのため、図 3 のバッテリー駆動システム用双方向電流センサを製作した。

この回路は R_3 の両端にかかる電圧を R_2/R_1 倍に増幅して C_o に出力させる。そして極めて小さい抵抗を R_3 に直列に接続することにより電流に与える影響を最小限のものとして測定することができる。よって C_o の電圧をマイコンで測定すると I_{R_3} は、

$$I_{R_3} = \frac{V_{R_3}}{\left(\frac{R_2}{R_1}\right) R_3} \quad (2)$$

という計算により求めることができる。本実験装置では $R_1=1$ [kΩ], $R_2=30$ [kΩ], $R_3=1$ [Ω] なので

$$I_{R_3} = \frac{V_{R_3}}{30} \quad (3)$$

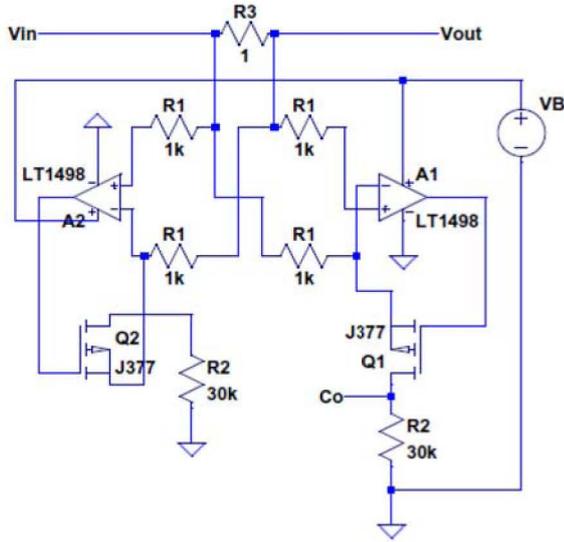


図 3: 双方向電流センサの回路図

となる。

また、マイコンを動作させる際には Applilet と PM+ を使用した。Applilet (Application Leading Tool) は、マイコン周辺機能 (インターバルタイマやポートなど) を制御するプログラムを自動生成するツールである。PM+ (Project Manager) は生成したプログラムを読み込ませるだけでマイコンを動作させることができる総合開発環境である。

SEPIC 回路の各素子については参考文献 [4] と LTspice によるシミュレーションによって選択した。実際に図 4 の回路を作って昇降圧実験を行ってみると、デューティ比が大きくなるにつれて出力電圧の値も大きくならなければならないが、出力電圧は低下した。この原因はインダクタ L_1 に大電流が流れ、熱が発生することによりインダクタを破壊して出力を低下させていたものであった。

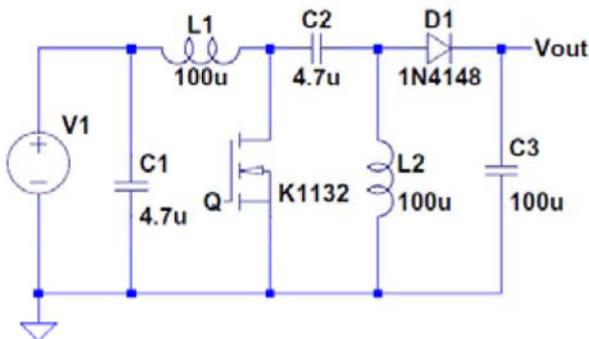


図 4: シミュレーションによって作成した SEPIC 回路

この問題を解決するために L_1 と L_2 に変圧器 HT-1205 をインダクタとして用いた。変圧器のインダクタの値を求めるために抵抗 $47 \text{ } \Omega$ と変圧器を直列につないで、そこに電圧をかけてオシロスコープで時定数を測定した。6 [V]-10 [V] 間を測定した結果、時定数は $148 \times 10^{-6} \text{ [s]}$ となった。時定数と L と R の関係より

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{4}$$

$$L = \tau R = 148 \times 10^{-6} \times 47 = 7.05 \text{ [mH]} \tag{5}$$

となる。

また、大電圧、大電流に耐えることができるように MOSFET を 2SK1837 に変更して放熱板をつけた。図 5 に改良した SEPIC 回路を示す。

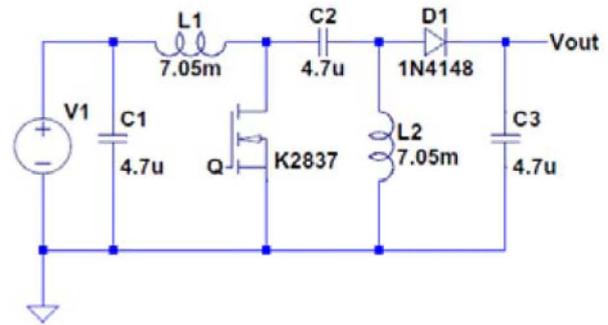


図 5: 改良した SEPIC 回路

しかし 2SK1837 はマイコンの PWM 最大出力の 5 [V] ではスイッチングが正常に動作しない。そのため図 6 のオペアンプを製作した。オペアンプはアナログ信号を増幅するための基本の IC である。ここで増幅された電圧は

$$Q = PWM \times \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 5 \times \frac{15 + 10}{15} = 8.33 \text{ [V]} \tag{6}$$

となり 2SK1837 を正常に動作させることができる。

最終的に使用する充電回路は太陽電池を入力として、オペアンプを取り付けた SEPIC 回路に電流測定回路と電気二重層キャパシタを接続したものをを用いる。そしてマイコンの PWM 制御によって SEPIC に取り付けられた MOSFET のスイッチングを自動化して目標の充電電圧に近づける。その回路を図 7 に示す。[5]

PWM 制御のスイッチング周波数はマイコンのプログラム設定で 20 [MHz], 20/2 [MHz], 20/4 [MHz], 20/64 [MHz], 20/256 [MHz] まで設定できる。20 [MHz], 20/2 [MHz], 20/64 [MHz], 20/256 [MHz] でシミュレーションを行ったところ、昇降圧しなかったり、立ち上がりが遅かったり、安定しなかったり時期

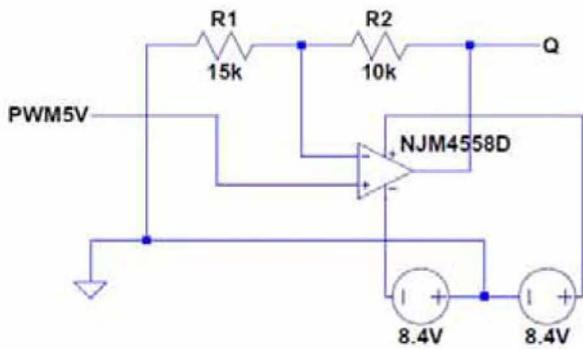


図 6: オペアンプ

待する動作をしなかった。20/4 [MHz] では期待していた結果が得られた。これは 20/4 [MHz] が MOSFET のスイッチング性能に適していたからと考えられる。そのため実験では 20/4 [MHz] を使用する。

マイコン制御プログラムについて説明する。はじめにフィードバック制御のブロック線図を図 8 に示す。

まずマイコンに目標電圧 r を設定する。そして出力電圧を A/D コンバータで測定し、目標電圧に近づくようなデューティ比を SEPIC 回路に出力し電圧を昇圧または降圧させるプログラムを作る。本実験では目標電圧 r は 2.5 [V] と定める。

プログラムを作るにあたり、式 7 のような比例制御の式を用いた。

$$\text{duty} = k(r - y) \quad (7)$$

しかしデューティ比が 100 [%] になると大電流がながれ回路を破壊する恐れがある。そのためデューティ比の最大値をあらかじめ設定する。また出力電圧が目標電圧を超えたときはデューティ比にマイナスの値が出てしまうので、デューティ比が 0 [%] になるように設定する。

k の値は 20, 50, 100, 1000, 10000 と定めて実験を行ったところ、20, 50, 100 では収束はするが目標電圧まで届かず、1000 では目標電圧に収束し、10000 では目標電圧を超えてしまった。そのため $k=1000$ をとして選択した。

次に比較回路について説明する。実験の比較回路として LINEAR TECHNOLOGY の LT1513-2, SEPIC 定電流、定電圧バッテリー・チャージャを使用した。LT1513-2 はリチウム電池や蓄電池に充電することが可能な IC である。図 9 に製作した LT1513-2, SEPIC 回路を示す。

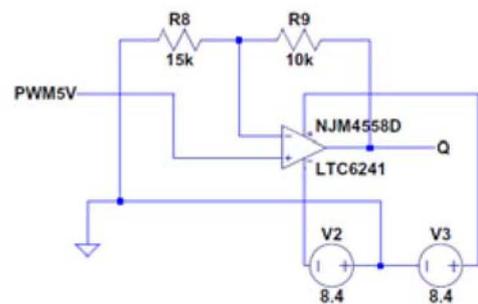
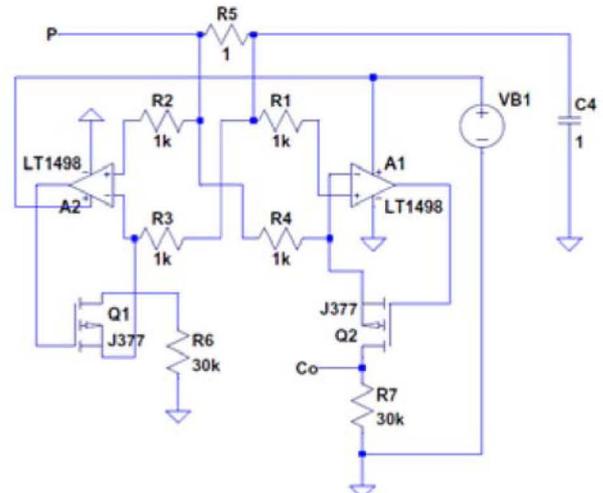
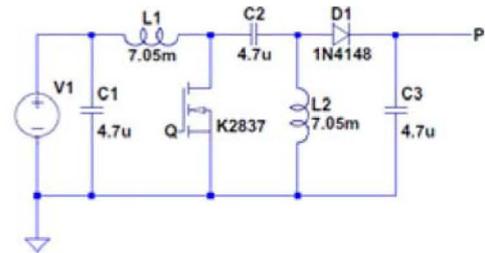


図 7: PWM 制御による SEPIC 充電回路

LT1513-2 は入力電圧に関係なく V_{FB} ピンに 1.245 [V] に固定された電圧が出力され、抵抗 R_1 と R_2 の比によって増幅した電圧を V_{out} に出力する。シミュレーションの結果、

$$V_{out} = 1.245 \times \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (8)$$

となることが分かった。

また、LT1513-2 は入力電圧が 2.5 [V] 以上ないと正常に作動しないとされている。



図 8: ブロック線図

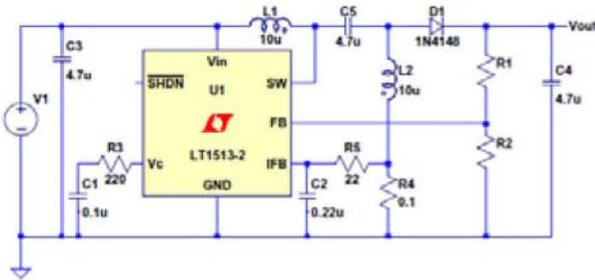


図 9: LT1513-2, SEPIC 回路図

5. 充電実験

本実験では太陽電池の開放電圧 6.08 [V] を入力として、1 [F] の電気二重層キャパシタを 2.5 [V] に充電する。目標充電電圧は式 8 より出力しやすく、電気二重層キャパシタの最大定格 5.5 [V] にあうため 2.5 [V] とした。しかし、太陽電池は電圧が変化すると、電流も変化する。そこで、昇降圧を行うことができる SEPIC 回路を用い、マイコンでデューティ比を変化させ、出力電圧を制御して電気二重層キャパシタに基準値まで充電させる。そしてその様子をオシロスコープで観察する。また比較回路の LT1513-2 でも同じように実験を行う。

PWM 制御を用いた SEPIC 回路の充電実験ではデューティ比の最大値を 80 [%] から 20 [%] まで変化させて電気二重層キャパシタへの充電の様子を測定した。実験結果を図 10 から図 16 に示す。

最大デューティ比 80 [%] のとき太陽電池を入力として接続すると、太陽電池の電圧が急激に下がった。そして実験の結果、目標とする充電電圧 2.5 [V] まで充電できなかった。また最大デューティ比 70 [%] のときも太陽電池を入力として接続すると、太陽電池の電圧が下がった。最大デューティ比 80 [%] に比べて充電電圧は高いがこの場合も目標電圧まで達しなかった。最大デューティ比 80 [%] と 70 [%] のときはデューティ比が大きすぎて流れる電流が大きいため、太陽電池の I-V カーブ特性によって入力電圧が小さくなってしまふ。そして SEPIC 回路の昇圧にも限度があり、その

小さくなった電圧を昇圧するため目標電圧に達することができなかったと考えられる。

最大デューティ比 60 [%], 50 [%], 40 [%], 30 [%] のときは目標電圧の 2.5 [V] に充電されていることが分かる。最大デューティ比が 40 [%] のときが一番速く目標電圧の 2.5 [V] に達している。そのため最大デューティ比を 40 [%] 付近に設定することで最適充電できると考えられる。

最大デューティ比 20 [%] の結果では最大デューティ比 70 [%], 80 [%] と同様に目標電圧の 2.5 [V] まで充電できていない。これはデューティ比が小さいために降圧されたと考えられる。

以上の結果から、最大デューティ比 60 [%], 50 [%], 40 [%], 30 [%] のときは電気二重層キャパシタを目標電圧の 2.5 [V] に充電させることができたため実験は成功したと言える。最大デューティ比 80 [%] 70 [%], 20 [%] のときは目標電圧には達しなかったものの電気二重層キャパシタに充電するという点では目標を達成したと言える。

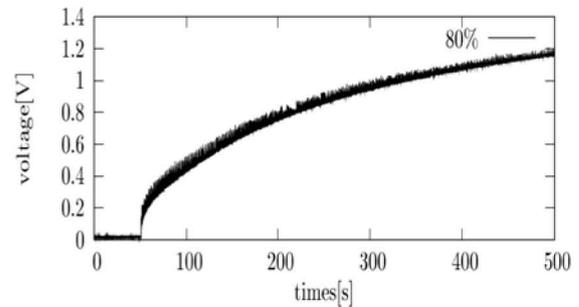


図 10: 最大デューティ比の 80 [%] の充電結果

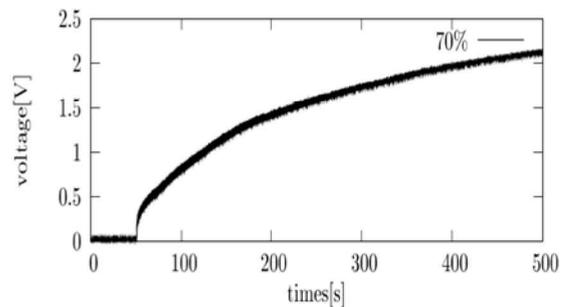


図 11: 最大デューティ比の 70 [%] の充電結果

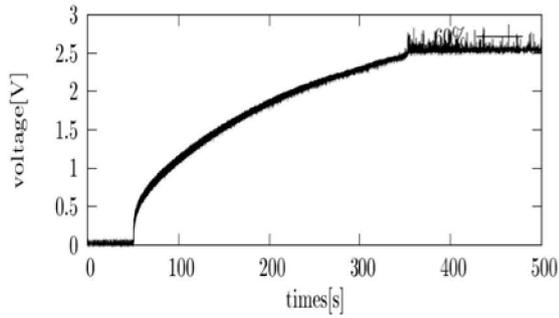


図 12: 最大デューティ比の 60 [%] の充電結果

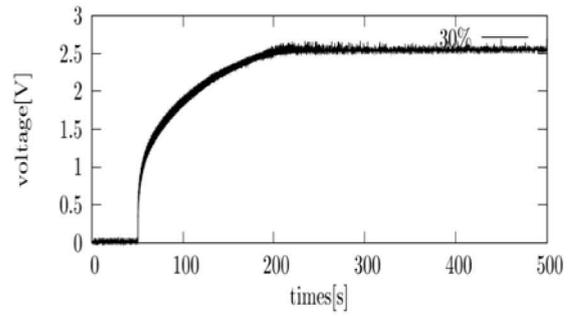


図 15: 最大デューティ比の 30 [%] の充電結果

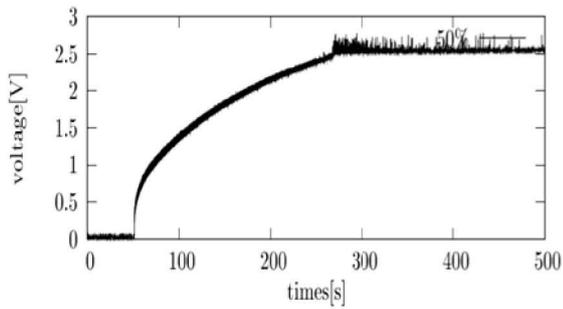


図 13: 最大デューティ比の 50 [%] の充電結果

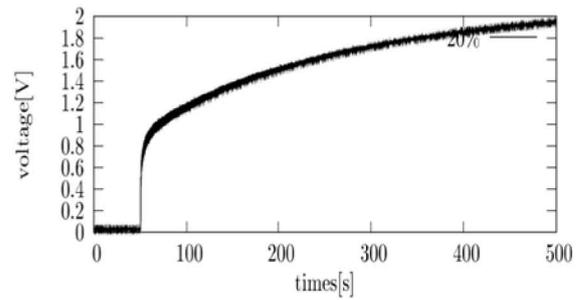


図 16: 最大デューティ比の 20 [%] の充電結果

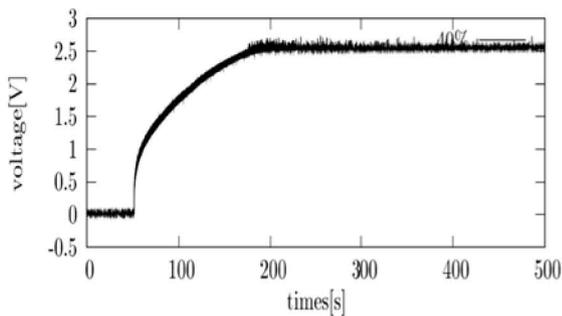


図 14: 最大デューティ比の 40 [%] の充電結果

次に LT1513-2 を用いた SEPIC 回路で充電実験を行った。目標電圧は 2.5 [V] のため回路に用いる抵抗は式 8 より $R_1=10$ [Ω], $R_2=10$ [Ω] とした。実験の結果を以下に示す。

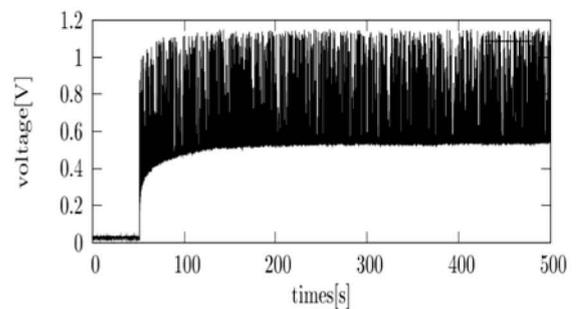


図 17: 比較回路の充電結果

結果は目標電圧の 2.5 [V] まで達しなかった。このときの入力電圧を調べたところ 2.3 [V] となっていた。この値はデータシートに記載されている最低入力電圧よりも低かった。そのため LT1513-2 が正常に動作しなかったと考えられる。

そのため直列に接続する太陽電池を増やして再度実

験を行った。図 18 は太陽電池を増やし入力電圧を上げたときの比較回路の実験結果である。

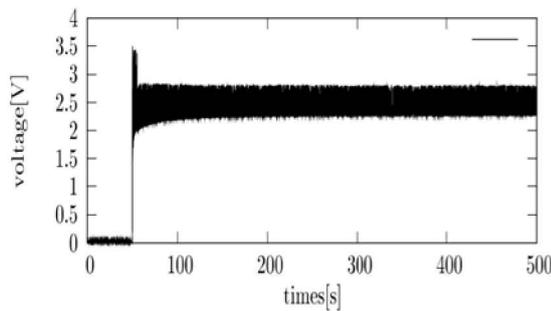


図 18: 入力電圧を上げた比較回路の充電結果

図 18 より比較回路では充電の立ち上がりが非常に速い。しかし目標電圧の 2.5 [V] 付近までいくが、安定せずずっと振動している。また充電し続けても電流が 0 [A] になることはなく、いつまでたっても充電完了にはならなかった。そして入力を 0 [V] にすると急激に電気二重層キャパシタの電圧が下がり、うまく充電できなかった。LT1513-2 は入力電圧が商用電圧電源により供給されることを前提としていて、実験から 2.5 [V] 以下の入力電圧では動作しない。

6. 考察

マイコンによる PWM 制御を用いた SEPIC 回路の実験では、最大デューティ比によって出力側に変化が見られた。最大デューティ比が大きすぎる場合や小さすぎる場合には目標電圧の 2.5 [V] に充電できなかった。最大デューティ比が大きすぎる場合、流れる電流が大きいため、太陽電池の I - V カーブ特性によって入力電圧が小さくなってしまふ。そして SEPIC 回路の昇圧にも限度があり、その小さくなった電圧を昇圧するため目標電圧に達することができなかったと考えられる。またデューティ比が小さすぎると降圧されるため目標電圧に達しなかったと考えられる。電気二重層キャパシタへの充電の様子を比較すると、最大デューティ比 40 [%] 付近に最適充電できるデューティ比があると考えられる。

製作したマイコンによる PWM 制御を用いた SEPIC 回路は既存の LT1513-2 を用いた比較回路に比べて次の点で優れている。

- 出力電圧を自由に設定することができる
比較回路では抵抗の比によって決まるため細かく設定できない。また式 8 より出力電圧を 1.245 [V]

より小さくすることができない。

- 入力電圧が低くても充電することができる
比較回路では最低入力電圧以上でないと LT1513-2 が動作しない。

7. おわりに

太陽電池の出力は日射量による変動が非常に大きく、太陽電池自体に蓄電機能はないため、太陽電池の電力を一時的に蓄電池に溜める方法が一般的に活用されている。太陽電池から蓄電池に充電する際、損失を少なくし、蓄電池が放電している時にも無駄なく太陽電池から蓄電池に充電したい。この方法として太陽電池と蓄電池の間に電気二重層キャパシタを接続するというものが考えられる。そのため本研究では、太陽電池から電気二重層キャパシタへの充電に焦点を置き、太陽電池を入力とした SEPIC 回路にマイコンを繋ぎ、MOSFET を自動動作させる信号を送り出力を制御して、電気二重層キャパシタに充電することを目的とした。その目標を達成するため、マイコンによる PWM 制御を用いた SEPIC 回路、LT1513-2 を用いた比較回路のそれぞれ製作して、電気二重層キャパシタに目標電圧を充電する実験を行った。

マイコンによる PWM 制御を用いた SEPIC 回路では比例制御プログラムを作って、デューティ比を変化させた。その結果、出力電圧が変化し電気二重層キャパシタへの充電電圧と充電時間も変化した。電気二重層キャパシタへの充電の様子を比較すると、最大デューティ比 40 [%] 付近に最適充電できるデューティ比があると考えられる。しかしどの場合においても電気二重層キャパシタに充電されていたため目標は達成したと言える。比較回路を正常に動作させると目標電圧の 2.5 [V] 付近まで電圧は出力される。しかし電気二重層キャパシタにはうまく充電できなかった。LT1513-2 は入力電圧が商用電圧電源により供給されることを前提としていて、実験から 2.5 [V] 以下の入力電圧では動作しない。

結論としてマイコンによる PWM 制御を用いた SEPIC 回路を使用すると電圧が変動する太陽電池であっても電気二重層キャパシタに充電できる。しかし I - V カーブの特性があるため目標の出力電圧まで達しないことがある。そのため今後の課題は I - V カーブの最適動作点とデューティ比の関係を組み合わせることが必要となる。また SEPIC 回路の素子を改善するともっと高精度な動作で電気二重層キャパシタに充電できると考えられる。

***参考文献**

- [1] 山口英彦：SEPIC の基本原理, DESIGN WAVE MAGAZINE NO. 19
- [2] 中野善之, 日比野陽三, 大泉純一：現代マイコン機械制御, オーム社 (1985)
- [3] 長谷川正明：修士論文 PWM 駆動による倒立振子の制御 (2004)
- [4] Wei Gu：SEPIC コンバータの設計, National Semiconductor Application Note 1484(2007)
- [5] Sedra/Smith：Microelectronic CIRCUITS, OXFORD(2004)