

研究成果報告書

研 究 題 目		セルバランス回路を有する直列リチウムイオンキャパシタモジュール低損失放電回路	実 施 年 度
			2020-2021 年度
代 表 研 究 者	所 属	近畿大学工学部	
	氏 名	中 田 俊 司	印

1. 研究の目的・背景

近年地球温暖化の問題が大きく取り上げられ、温暖化の原因となる温室効果ガスの排出量を実質ゼロとする社会の実現が期待されている。この脱炭素社会を実現するには、化石燃料に頼らず風力や太陽光などの再生可能エネルギーによる電気エネルギーの大量の供給が必要となる。この電気エネルギーの供給は必要な時に必要とする分を供給することが求められているため、電気の蓄電という技術が必須となる。

この蓄電デバイスの重要な特性の一つとして電力入出力密度があげられる。蓄電・放電に長い時間がかかってしまうと、再生可能エネルギーからの電力の受け取りが困難になる。また電力を供給しようとするときに短時間に十分供給できないといった問題が生じる。この点において、リチウムイオン電池の 10 倍の電力入出力密度をもつリチウムイオンキャパシタや電気二重層キャパシタなどのスーパーキャパシタの利用が期待されている。キャパシタであれば、電気自動車においては数分の時間で大量の電気エネルギーが蓄電可能となる。また工場においては、大量の電気エネルギーを必要とする瞬間においてキャパシタから 1 日数百回であっても供給が可能となる。

このキャパシタの放電時においてはバッテリーと異なり電位が低下するという問題が発生する。これを解決するために、キャパシタを充電時は並列とし放電時は直列接続とする回路とし、どちらの場合も降圧回路をもちいて充放電を行う回路を考案した。本研究ではキャパシタ充放電回路の有効性を確認することを目的として研究を行った。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

トランジスタとコイルを用いた降圧・昇圧回路において同じ有効電力の場合に、エネルギー効率値を SPICE シミュレーションにより測定した。図 1 にシミュレーションに用いた回路および効率値を示す。降圧は 5V から 3V、昇圧は 2.5V から 3V とし、負荷抵抗は 0.4 から 5Ωとした。負荷抵抗が小さくなると降圧回路が優位となることが示された。次にこれを実験により確認を行った。図 2, 3 は降圧・昇圧回路の出力電圧を示す。入力電圧は降圧・昇圧に対し 18 および 8V としている。トランジスタが ON となる割合 Duty 比を変化させ出力電圧を測定した。黒線は理論値であり、以下負荷抵抗 50, 20, 12Ωの値を測定している。50Ωでは理論と一致しており、それより負荷抵抗が小さくなるとより低い電位となる。さらに出力電圧を同じ 12 V とした時のエネルギー効率値を図 4 に示す。負荷抵抗が 12Ωのときには昇圧回路では大きく効率が低下することが実験においても明確に確認できた。

次にセルバランス回路を有するキャパシタモジュールの実装を行った。図 5, 6 はオペアンプ TLV9101 を用いた 5 直列キャパシタ回路および実装写真である。ボルテージフォロワ回路により 100kΩの直列接続抵抗より電位を取り出しキャパシタの電位を固定する。1 セルあたり 2.2 から 3.6V までの領域において、セルバランスが保たれ充電（図 7）および放電（図

8) できる回路を実現した。

提案するキャパシタの充放電において、定電圧定電流回路をデジタル的に実現するならば IoT やスマートグリッドへの展開が容易となる。このデジタル制御を実現すべくマイクロコンピュータを用いたプログラミング処理による定電圧定電流回路を実現した。図 9 に回路図を示す。電流制御にはシャント抵抗を用い電位差を 5 倍し PIC マイコンの 5 番 pin に、また電圧制御のため出力電圧を 3 番 pin に入力する。設定電圧・電流は 2 番および 4 番 pin に入力する。ブレッドボードに実装した回路を図 10 に示す。定格出力電圧を 3.7V とし、定格電流を 0.1, 0.5, 1.0 A とし、キャパシタを負荷として定電流充電を行った。キャパシタ電圧およびキャパシタ充電電流を図 11, 12 に示す。図 11 において、1A 時に充電開始時にみられる電位の急激な変化はキャパシタ内部抵抗および配線抵抗によるものである。3.7V 到達後はこの電圧が維持される。図 12 にみられるように、3.7V 到達前は定電流充電が行われ、その後電流値が低下する典型的な定電圧定電流動作を実現した。これによりキャパシタへの定電流充電およびキャパシタからの定電流放電が可能となる。

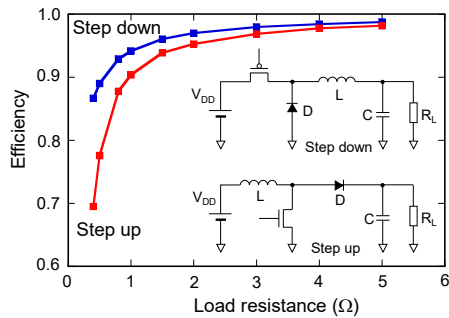


図 1

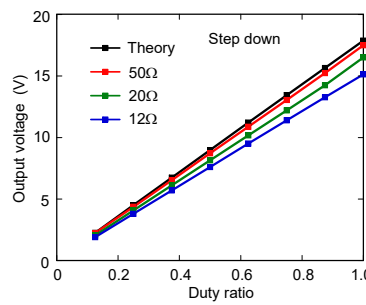


図 2

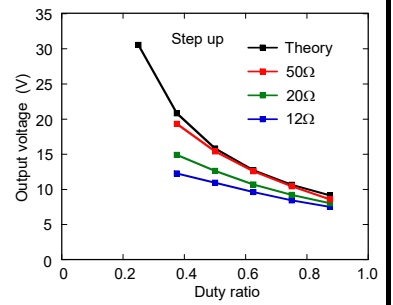


図 3

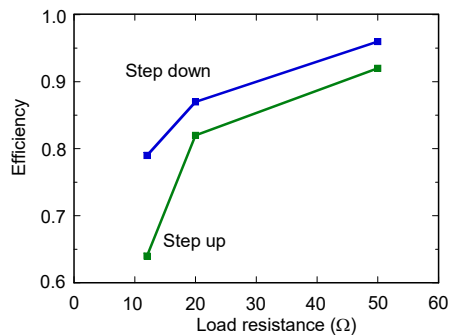


図 4

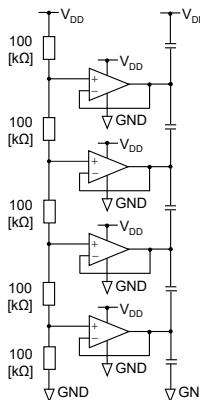


図 5



図 6

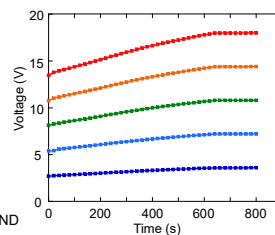


図 7

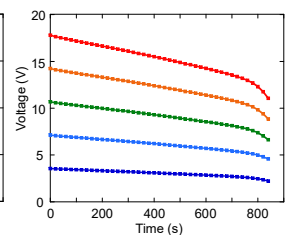


図 8

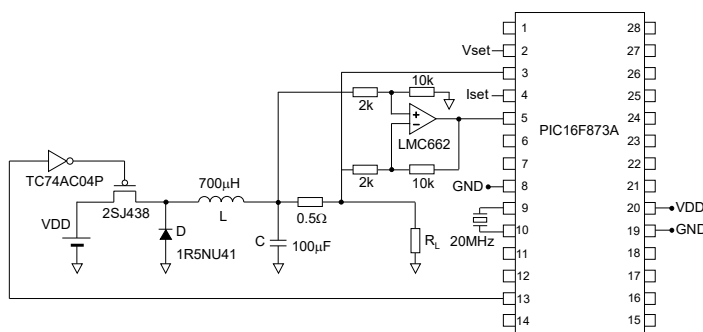


図 9

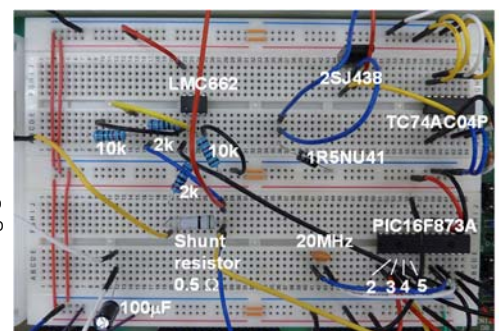


図 10

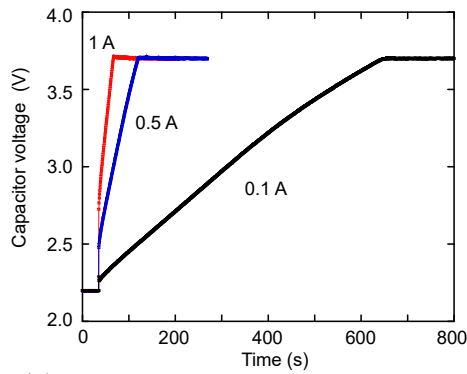


図 11

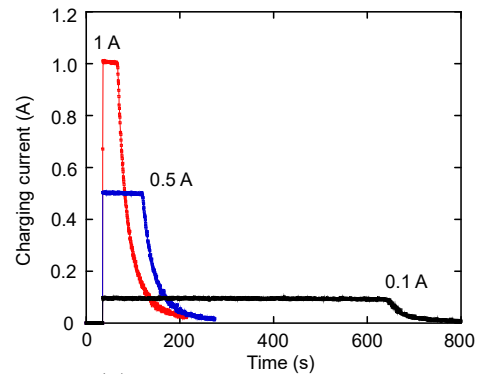


図 12

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

【消耗品費】 キャパシタ充放電のために申請通りシリンダ形リチウムイオンキャパシタを購入した。電圧・電流測定のためにハンドヘルドデジタルマルチメータを 3 個購入している。バランス回路を有するキャパシタ 5 直列回路実装のためにプリント基板に実装した回路を 12 個購入した。降圧・昇圧回路の測定を容易にするために専用プリント実装基板を 24 個作製した。また定電圧定電流回路をブレッドボードに実装のため IC トレーナを 3 個購入した。

【発表費用】 成果発表のため、令和 3 年および令和 4 年電気学会全国大会において発表を行った。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

リチウムイオン電池の 10 倍大きな電力入出力密度を有するキャパシタを蓄電デバイスとして、リチウムイオン電池を一部代替しようとする機運が高まっている。本研究においてキャパシタを充電時並列・放電時直列とし降圧回路を用いて充放電電流を制御する回路の有効性を SPICE シミュレーションと実装基板により実験的に明らかにした。キャパシタに関してデジタル的に効率よく充放電を行うシステムについて一連の研究を電気評論特集号に論文掲載を行った。提案する回路は新規性・進歩性が認められ特許査定が 2021 年 8 月になされた。キャパシタの直並列変換を行うにはキャパシタ直列接続の端子間においてセルバランスの必要があるがオペアンプを用いれば、電圧の不均等が生じた場合のみオペアンプが動作してセルバランスが実現できることを確認した。これによりキャパシタ直列接続による大きな出力電圧が可能となる。

従来定電圧定電流制御はアナログ制御方式が用いられており、方形波発信器・積分器により三角波を生成しこれをオペアンプの一端子に入力し+端子には設定電圧を入力することにより PWM 波形の Duty 比が制御されてきた。この方法は必要な回路をその都度設計する必要があり汎用度が低い。これに対し今回設計実装したデジタル制御方式は完成度も高く様々な電圧・電流値において導入が容易である。定電流時に比較的ノイズが多い理由はマイクロコンピュータに用いた電源電圧にノイズがあるためであり、精度の良い基準電圧を用いてマイクロコンピュータの設定電圧とすることにより一段と高精度な定電流値が期待できる。本システムはリチウムイオン電池の充電にも適用が可能である。

また本研究は SPICE シミュレーションによる降圧回路を用いた放電の優位性を研究の出発点として始めた。本研究を進める過程において SPICE シミュレーションのアルゴリズムを明らかにしており、SPICE と全く同じ計算結果を得つつ、より高速に動作する回路シミュレータが開発できる指針を得ている。今後多くの蓄電デバイスが接続された電力ネットワークの電位予測などにも応用可能と考えられる。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

【論文】

[1] 中田 俊司、リチウムイオンキャパシタを用いた高効率電気エネルギー蓄電システム、
電気評論 特集 エネルギー貯蔵 106(6) pp.14-18 2021 年 6 月.

【特許】

[1] 中田 俊司、キャパシタの充放電回路、
特許第 6945219 号、特許査定 2021 年 8 月 31 日.

【学会発表】

[1] 谷口穂香, 末次澄香, 中谷太一, 竹辺和磨, 小山蒼維, 北正貴大, 中田俊司
修正節点解析法を用いた C 言語による設計自由度の高い回路シミュレータ
令和 3 年電気学会全国大会（オンライン）, 3-018, pp.23, 2021.

[2] 谷口穂香, 田口鈴華, 中田俊司
降圧・昇圧回路におけるエネルギー変換効率
2021 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会（オンライン）, R21-12-01, 2021.

[3] 田口鈴華, 谷口穂香, 中田俊司
昇圧回路におけるエネルギー変換効率の負荷抵抗依存性および出力電圧変動抑制回路
2021 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会（オンライン）, R21-12-02, 2021.

[4] 西本和暉, 中戸春馬, 中田俊司
Python による回路シミュレーションの開発
2021 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会（オンライン）, R21-12-09, 2021.

[5] 中戸春馬, 西本和暉, 中田俊司
修正節点解析法を用いた Python による回路シミュレーション
2021 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会（オンライン）, R21-12-10, 2021.

[6] 谷口穂香, 中田俊司
降圧・昇圧回路のエネルギー変換効率の比較実験
令和 4 年電気学会全国大会（オンライン）, 4-035, pp.56, 2022.

[7] 中田俊司
デジタル定電圧定電流回路を用いたキャパシタ直並列変換蓄電デバイス
2022 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会（オンライン）, 2022（発表予定）.