

倍電圧整流回路を用いた独立型交流電池向け電源システムの提案

米盛 弘信, 中川 湧貴, 千葉 穰, 津田 浩平, 久保 直嗣^{*1}, 水沢 厚志^{*1}

Proposal for a Power Supply System for Stand-Alone AC Batteries Using a Double-Voltage Rectifier Circuit

Yonemori Hironobu, Nakagawa Wakutaka, Chiba Joe, Tsuda Kohei, Kubo Tadashi^{*1}, Mizusawa Atsushi^{*1}

In this paper, a new power supply system combining an AC battery and a boost circuit will be developed and its advantages clarified. The AC battery developed by AC Biode AC Biode Co., Ltd. has half the potential by inserting a Biode between the Anode and Cathode, and can output AC waveforms with safety and long life. The authors proposed connecting a voltage booster circuit as a method of maintaining the original potential while taking advantage of the AC battery's features. By using an EDLC with high capacity and low internal resistance in the voltage multiplier circuit, the proposed system can boost the AC voltage output from the AC battery and reduce the voltage drop of the battery, thereby increasing the capacity of the entire system.

1. まえがき

2020年10月、日本は2050年カーボンニュートラル実現を宣言した。これを実現するグリーン成長戦略として、産業分野では蓄電池の活用を検討している。また近年では、電気自動車(Electric Vehicle : EV)や家庭用ロボットが多く普及しており、蓄電池の市場規模が拡大し続けている。蓄電池の中でもリチウムイオン電池(Lithium-ion Battery : LiB)は、小型・軽量・大容量で便利である¹⁾。しかし、充放電の繰返しから劣化が進み、容量が初期値の20~30%まで低下したときに寿命と考えられ、これを超えての使用は危険が高まる²⁾。一方で、LiBの需要に対して材料のリチウムが生産量に追いつかず高コスト化している³⁾。このような課題を改善できる新たな電池開発には、多大な時間と資金が掛かると予想されている。事実、LiBが開発されて以来約30年間、原理・原則は変わっていない。さらに、既存の電池は全て直流電池であり、交流負荷に用いる場合は波形変換を行うインバータ回路が必要となり、損失が生じてしまう。このような背景から2016年、AC Biode株式会社が独立型交流電池を開発し、特許⁴⁾を取得した。

図1に交流電池の試作品を示す。交流電池の特徴として、正極(Cathode)と負極(Anode)の間に両性電極(Biode : AC Biode社が開発した特殊電極)を挿入することで電位が1/2になり、安全性かつ長寿命化を実現し、さらに外部スイッチによって交流波形を出力できる。著者らは、交流電池の特長を活かしつつ、

本来の電位を維持する手法として昇圧回路を接続することを提案している。コッククロフト-ウォルトン回路(Cockcroft-Walton Multiplier : CWM)や倍電圧整流回路等の昇圧回路は、交流電圧を直流高電圧へ容易に変換できる。本提案システムは、昇圧回路に大容量かつ内部抵抗の小さい電気二重層コンデンサ(Electric Double-Layer Capacitor : EDLC)を用いることで、交流電池より出力される交流電圧を昇圧すると共に、電池の電圧降下を低減することでシステム全体の容量増加が期待できる。

本論文では、AC Biode株式会社が開発した交流電池と昇圧回路を組み合わせた新たな電源システムの開発を目指し、倍電圧整流回路に用いるEDLCの容量と周波数、および負荷変動した際における提案システムの電力変換効率と実動作を想定した優位性を明らかにする。また、EDLCを用いたCWMと倍電圧整流回路の充電特性を比較して本電源システムに適する昇圧回路を報告する。



図1 交流電池の試作品

*1 AC Biode 株式会社

2. 組電池の構成法と劣化要因

2. 1 組電池の構成法

本研究の根源として、モビリティなどに搭載される組電池の接続方法に着目している。図2に、組電池の構成法を示す。図2のように、複数の電池セルによりモジュールが形成され、さらにモジュールを組み合わせることで電池パックが構成される。このとき、電池パックの定格設計はセルの直列接続数を増やすことでセルの個数分だけ、高電圧・高出力が可能となる。一方、並列接続数を増やすと電圧値は一定だが、電池パック全体の容量が増加する。

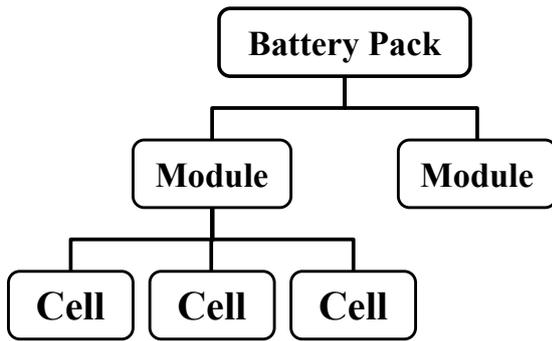


図2 組電池の構成方法

2. 2 内部抵抗のバラツキによる劣化

図3は、直列接続時と並列接続時における各セルの満充電時の容量(Full Charge Capacity : FCC)を示す。通常、電池パックには過充電や過放電など電池の異常による事故を防止する目的やセルの充電状態(State Of Charge : SOC)をモニタリングして状態管理をするためにバッテリーマネジメントシステム(Battery management system : BMS)が実装される。蓄電池は、セルによって内部抵抗値が異なり個体差が存在する。この内部抵抗値のバラツキによって充放電時の電流や電圧、SOCが不均一になり、経年変化と共に劣化は加速する。図3に示すように、BMSの役割によって直列接続時は各セルに流れる電流値が一定であるため劣化した最小容量のセルが過充電状態となる。このとき、満充電されないセルでは容量ロスが生じる。また、放電時には充電時に容量ロスが大きかったセルから過放電状態に陥る。このように、劣化しやすいセルは特定化されて、長期サイクルによって劣化が進行し、FCCは減少していく⁵⁾。実際に、廃バッテリーの再利用可能なセルについては組み替えてリサイクルされるケースがある。一方、並列接続時は元々すべてのセルに均一な電圧が印加されるように電流が流れるため、各セルのSOCが均

等になりやすい。よって、セルの並列接続は蓄電池を長寿命化することに長けているといえる。

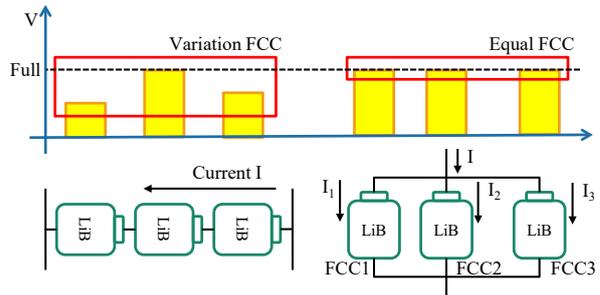


図3 直列接続時と並列接続時における各セルの満充電時の容量

2. 3 負荷変動による劣化

図4に蓄電池の劣化状態を示す。蓄電池の構成には、電極材料や電解質溶媒が用いられており物理現象や化学反応を繰り返していることから使用期間や方法に乗じて劣化メカニズムが生じる⁶⁾。また、一般的なグラファイト負極を用いたLiBは、低温および高温下・高Cレート帯放電・過充電および過放電等の使用環境により劣化が促進されることが知られている。そのため、LiBは一定電位での定常放電であれば化学反応における副反応(電極表面の炭酸層やフッ素化層の生成、ガス発生、リチウムイオンの減少)が抑制され電極の腐食が発生しづらくなる。本研究ではこのような電位変動による劣化要因の改善案も提案している。またケースとして現在、EVやドローン、家庭用ロボットに蓄電池が実装されている。これらの動作を想定すると起動・停止若しくは負荷変動が繰り返し行われる。このとき、当然ながら蓄電池の電位は負荷に応じて変動する。このように、蓄電池の電位が頻繁に変動することは電極の腐食が加速され、電池特性の低下が促進される。以上の事象から、蓄電池を一定電位で放電できるシステムを開発することが重要である。

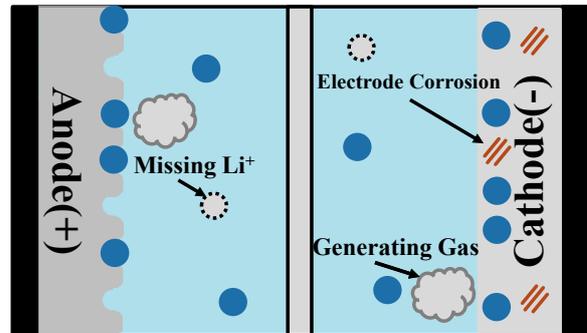


図4 蓄電池の劣化状態

3. 交流電池の開発

AC Biode 株式会社は、材料や製造ラインをすべて既存のものを利用して製造のハードルを下げ、電池の並列接続の概念により電池の長寿命化等、従来の電池と比較して多くのメリットを有する新電池の開発を目指している。

図 5 に交流電池の内部構造を示す。交流電池に用いられる Biode は、イオンの流れに応じて Cathode と Anode 両方に対応できる性質を有する。交流電池は簡潔に述べると、複数の LiB を並列接続したものを 1 セル中に並べたものと等価であるため、パッケージ時に用いられるアルミフィルムが重複せず、従来の LiB よりも 30%程コンパクトになる。図 5 のように交流電池は、正起電圧を Anode-Biode 間、負起電圧を Biode-Cathode 間で生成する構造となっている。また、外部信号により半導体スイッチを操作することで任意の周波数で交流電圧を取り出すことができる。

らに、著者らは交流電池に電気回路を組み合わせることで急峻な負荷変動を電気回路で補償して電池の電圧降下を低減し、負担を軽減する手法に着目した。加えて、電気回路には蓄電素子を多用することで蓄電可能とし、電源システム全体の容量を増加でき、長寿命化も実現できると考えた。本電源システムは、電気回路を用いることから回路の高効率化も本研究における重要な要素となる。

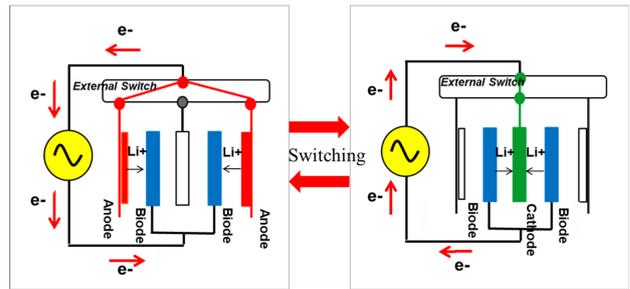
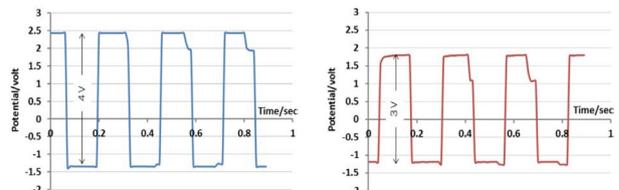


図 5 交流電池の内部構造

4. 交流電池の現状と提案する電源システム

4. 1 交流電池の現状

図 6 に交流電池の試作品を用いて 100mA-3.75Hz で充放電を行った際に得られた矩形波を示す。図 6 のように低電力・低周波数帯において交流電池の充放電が可能であることを確認している。しかし、現在、交流電池は市場には販売されておらず、周波数特性や構成材料の最適化、使用可能電力の増大等を検討しており、改良を重ねている段階にある。そこで、現在は直流電源とインバータ回路を組み合わせた供試システムで交流電池を模擬して研究を進めている。本研究は、今後交流電池の製品化が完了次第、最速で実証・実用化に繋げるための重要なフェーズである。



(a) 充電(100mA, 3.75Hz) (b) 放電(100mA, 3.75Hz)

図 6 試作品の交流電池における充放電波形の例

4. 2 提案する電源システム

現在、LiB は高性能化において急速な成長を遂げている。しかしながら、前述した通り、既存の二次電池は放電後も余剰電力が存在し、完全に電力を使い切れておらず、急峻な負荷変動により電極が劣化してしまうことが課題として挙げられている。そこで、本研究で提案する電源システムは、従来の直流電池を並列接続した際と同義の構造を有する交流電池で電池を効率よく充放電させて長寿命化する。また、並列接続を前提としている交流電池であれば BMS の個数を少なくすることができると考える。さ

5. 電力変換効率と EDLC の容量変動特性

5. 1 電源システムの高効率化

交流電池が特性等の改良を重ねている現在は、直流電源とインバータ回路を用いることで交流波形を模擬する。本研究では、交流電池を模擬するインバータ回路に H ブリッジ回路とハーフブリッジ (Half-Bridge : H.B.)回路を検討する。先行研究[7]では、H ブリッジ回路と CWM を組み合わせた供試回路を製作し、提案システムの動作特性と電力変換効率を明らかにした。その結果、システム全体の電力変換効率は最高 82%となった。また、CWM は構造上 EDLC の個数が多くなり体積が大きくなった。そこで、電力変換効率の向上とシステムの最適化を目指して提案システムの再構築を行う。まず、インバータ回路は、4 石式 H ブリッジ回路から 2 石式 H.B.回路に変更することで素子数を減らし低損失化を図る。また、H.B.回路であれば交流電池の Anode, Cathode, Biode の電極をより再現できる。さらに、昇圧回路は CWM と比較して EDLC の個数を削減できる倍電圧

整流回路を用いてシステムを小型化および高効率化を目指す。この昇圧回路の比較については、6章に記載している。

5. 2 回路設計

図7は、提案システムの構成である。本論文では、システムの駆動時間や積算電力を比較する実験が伴うため、18650型LiB(KEEPPOWER製3.7V(満充電時:4.2V)-2600mAh)を電源として用いることを想定して実験条件を設定している。そのため電源構成は、4直接続した18650型LiBの中間電位をBiodeとして再現し、正起電圧および負起電圧の電圧値を各8.4V(4.2V×2)と規定している。次に、波形変換部では電源電圧をSiC-MOS-FET(SCT3040KLG11)を用いたH.B.回路によりDC-AC変換を行う。本回路のゲート制御は、ファンクションジェネレータ(AFG-2005)より矩形波を生成し、H.B.ドライバ(IR2302)を介してハイサイドとローサイドのMOS-FETを駆動する。以上より、発生した交流パルスを倍電圧整流回路で、昇圧・整流・蓄電を行う。本実験で用いるEDLCは、10(ESR:25mΩ), 50(ESR:12.5mΩ), 100F(ESR:6mΩ)を選定した。

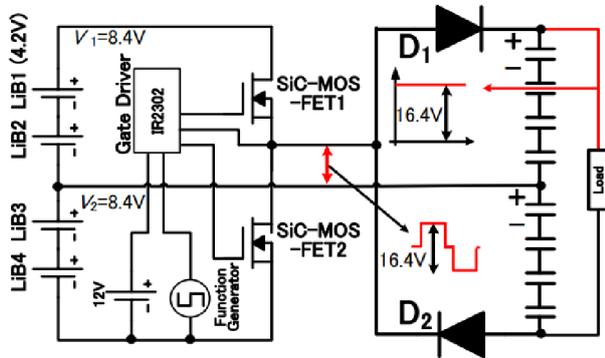
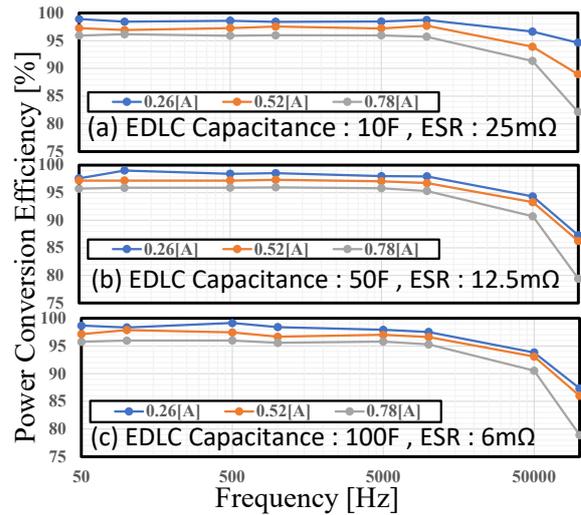


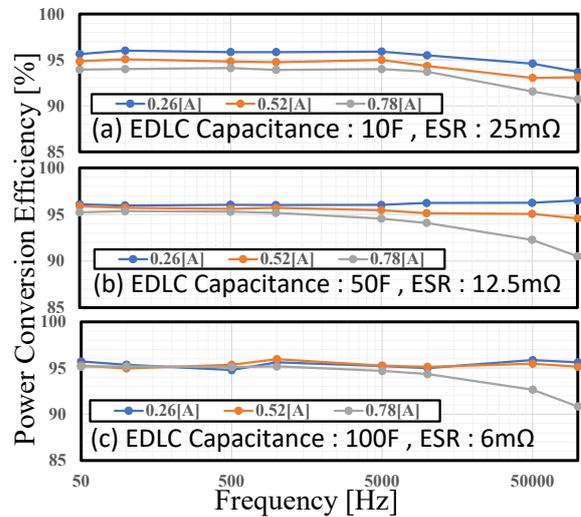
図7 提案システムの構成

5. 3 高効率化した電源システムの電力変換効率

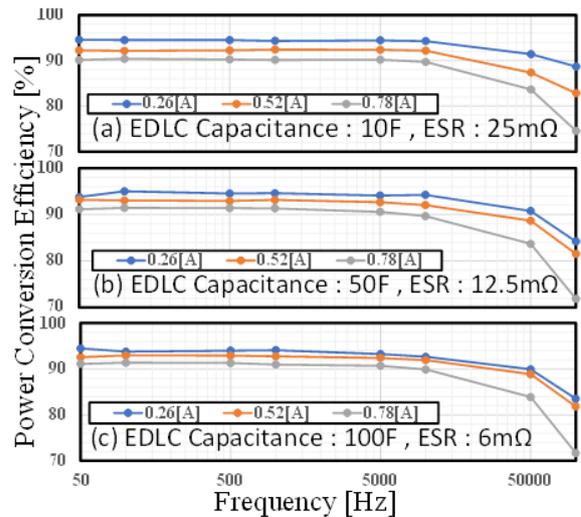
本実験は、直流安定化電源(PWR400L)を用いて供試回路を動作し、電子負荷装置(PLZ334W)によって0.1C(0.26A), 0.2C(0.52A), 0.3C(0.78A)の各値で定常駆動した。なお、電源電圧は18650型LiBの1セル当たりの満充電時を想定してV1, V2共に8.4V一定とした。システムの駆動周波数は、50, 100, 500Hz, 1, 5, 10, 50, 100kHzの各値でH.B.回路と倍電圧整流回路、およびシステム全体の電力変換効率を算出する。また、電力変換効率はパワーアナライザ(PPA1530)で測定した。



(a) H. B. 回路の効率



(b) 倍電圧整流回路の効率



(c) システム全体の効率

図8 システム各部の電力変換効率

図8は、提案システムに用いるEDLCの容量と周波数を変動したH.B.回路、倍電圧整流回路およびシステム全体の電力変換効率である。図8(a)より、H.B.回路の最大効率は99.1%となった。また、使用したSiC-MOS-FETの特性により、10kHz以上の高周波帯の効率は減退した。図8(b)より、倍電圧整流回路の最大効率は96.5%となった。本昇圧回路部では、高周波帯でショットキーバリアダイオードが飽和傾向になり10kHz以上で効率が減退したが、本回路での効率が90%を下回ることはなく高効率駆動した。図8(c)より、システム全体の最大効率は95.0%となった。

以上より、本システムは周波数の最適値が10kHz以下であることがわかった。また、EDLCの容量を変動した際のシステムへの影響は少なかった。これは、内部抵抗値(ESR)に起因する現象で、今回、実験に供したEDLCは容量が比較的小さく、ESRの変化が小さかったため電力変換効率に与える影響は少なかったと考えられる。

5. 4 積算電力による提案システムの優位性

本実験は、LiBを用いて提案システムを動作し、モビリティの動作を想定して電子負荷装置で10秒ごとに0.1C, 0.2C, 0.3Cの各値をループさせて負荷変動した。駆動周波数は、電力変換効率の結果から10kHzとした。LiBの放電時間はバラツキが生じるため、実験は3回行い平均値を算出している。結果は、18650型LiB側(V1+V2)と電子負荷側の積算電力を評価する。また、提案システムを介さず、4直接接続したLiBを負荷変動した際の単純放電結果(従来法)と提案法の駆動時間および積算電力を比較する。

表1は、従来法と提案法の積算電力および駆動時間の比較である。表1より、従来法②と比較して提案法①の積算電力は、より多くの電力量を引き出した。さらに駆動時間に着目すると、従来法⑤より提案法④の方が長く駆動したため提案する電源システムの優位性を確認した。しかし、電源システム全体③と従来法②の積算電力を比較した際に回路の損失によって従来法に劣った。これを改善する案として、倍電圧整流回路に採用しているショットキーバリアダイオードをSiC化することで更なるシステムの高効率化が望める。

6. EDLCを用いた昇圧回路の動作特性比較

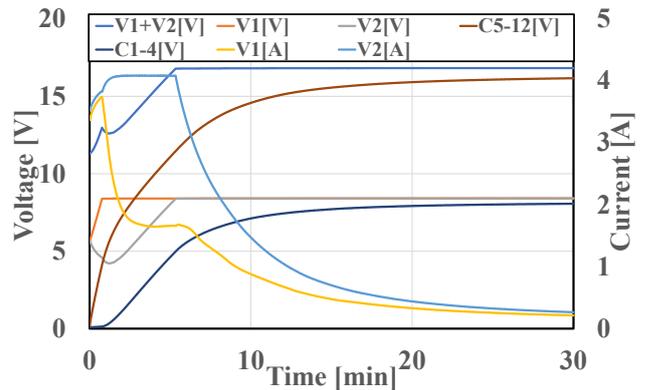
本実験は、H.B.回路にCWMおよび倍電圧整流回路を接続して充電特性を比較する。充電は、30分間

無負荷で行い、V1, V2共に8.4Vとし、駆動周波数は10kHzとした。EDLCは、比較結果をより顕著にするため容量:600Fを採用した。

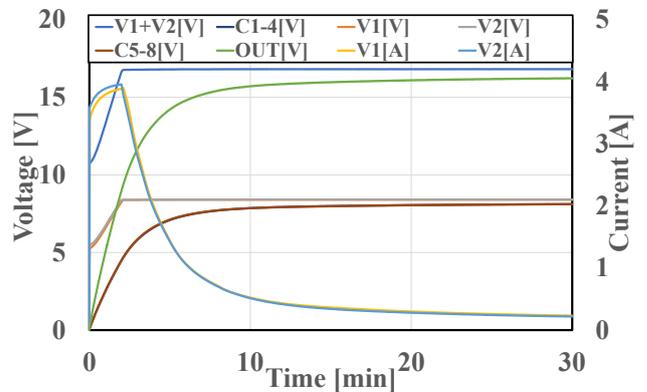
図9はCWMおよび倍電圧整流回路の充電特性の比較である。図9(a)より、CWMはV1, V2で電圧/電流共に時間推移でバラツキが生じており、V2側に偏って過負荷が生じている。一方、図9(b)より倍電圧整流回路はV1, V2共にバランスよく放電されていることがわかる。これは、昇圧回路に用いるEDLCの個数が影響していることがわかる。よって、本システムでは高効率化・小型化・安全性の観点から倍電圧整流回路を採用することがシステム設計上望ましい。

表1 従来法と提案法の積算電力・駆動時間の比較

Mode	Capacitance[F]	18650[Wh]	System Output[Wh]	Drive Time[h]
Proposal System	10	① $\begin{cases} 44.0 \\ 41.3 \\ 44.6 \end{cases}$	③ $\begin{cases} 30.8 \\ 29.1 \\ 31.7 \end{cases}$	④ $\begin{cases} 4.2 \\ 4.1 \\ 4.3 \end{cases}$
	50			
	100			
Conventional System	-	② 32.5		⑤ 3.9



(a) CWM



(b) 倍電圧整流回路

図9 CWMおよび倍電圧整流回路の充電特性の比較

7. まとめ

本論文では、交流電池と昇圧回路を組み合わせた新たな電源システムの開発を目指し、直流電源とインバータ回路で構成される供試システムで交流電池を模擬した際に倍電圧整流回路に用いる EDLC の容量と周波数、および負荷変動した提案システムの電力変換効率と実動作を想定した優位性を明らかにした。また、EDLC を用いた CWM と倍電圧整流回路の充放電特性を比較して本電源システムにおける最適な昇圧回路を報告した。本論文で明らかにした事項は、以下の(1)(2)である。

- (1) 倍電圧整流回路に用いる EDLC の容量と周波数、および負荷変動した提案システムの電力変換効率と実動作を想定した優位性において、先行研究で提案したシステムの電力変換効率 82% に対し、本提案システムは 95% を達成して高効率化することに成功した。本提案システムは、周波数特性から判断すると 10kHz 以下で実用性がある。また、本実験の容量変動範囲では EDLC による電力変換効率への影響は少なかった。さらに、電池側でより多くのエネルギーを引き出すことが可能であり、従来法との比較における優位性を得た。
- (2) H.B.回路に CWM および倍電圧整流回路を接続した際における充電特性の比較において、CWM の動作原理上の構造から EDLC の個数が増加してしまい、片側の電源に過負担が生じることが明らかになった。一方、倍電圧整流回路においては EDLC の個数を削減でき、電源の出力が均一に行われることから、本システムでは、高効率化・小型化・安全性の観点から倍電圧整流回路を採用することが最適である。

以上の結果より、今後の展望として実験 5.4 で明らかになったシステム全体の積算電力においても優位性を取得するために、昇圧回路において低損失化を目指し、ショットキーバリアダイオードを SiC 化することで更なる高効率駆動を実現する。また、本提案システムを実用段階に近づけるため EV やドローン、家庭用ロボットに実装した際における従来電源システムとの比較データを取得していきたい。

文献

- 1) M.Hirayama : “Structures and Electrochemical Properties at Electrode / Electrolyte Interfaces in Lithium Ion Batteries”, The Surface Science. Vol38, No.12, pp.626-631(2017)
- 2) T.Hashimoto, H.Munakata and K.Kanamura : “Study on Prediction Model of Performance and Degradation of LFP/Graphite Lithium-ion Battery”, The Electrochemical Society of Japan. Vol89(3), pp.303-312(2020)
- 3) P.Vargas : “Lithium and the Foreseeable Future” Bachelor’s Thesis, University of Arkansas, Fayetteville, AR, USA, 2018.
- 4) 水沢厚志 : 「二次電池並びに充電装置及び放電装置」, 特開 2016-171075(P2016-171075A), 2016
- 5) M.Fukui and M.Arima : 「Smart Grid and Battery Management Technology」, CORONA PUBLISHING CO.,LTD., pp.66-69(2022)
- 6) 小山昇 : 「リチウムイオン二次電池の劣化因子・特性評価の基礎と応用-充放電特性, 劣化評価, インピーダンス測定, 高速パルス測定-」, 特集 工業材料, Vol69(7), pp.12-21(2021)
- 7) 中川湧貴, 米盛弘信 : 「EDLC を用いた全波整流型 CW 回路の充放電試験」第 39 回電気設備学会全国大会講演論文集, pp.123-124(2021)

謝辞

本研究は、AC Biode 株式会社との産学連携で進めており、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成金交付により遂行されたものです。また、複数の新聞等、記事に掲載されており、この場を借りて、ご関係者の皆様に感謝致します。