

2021 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	千葉大学 大学院工学研究院
職位または役職	助教
氏 名	小林 宏泰

1. 研究題目

蓄電装置搭載鉄道車両におけるモータ電圧昇圧による省エネルギー化の研究

2. 研究目的

近年の蓄電装置の性能向上により、図 1 に示すような蓄電装置と従来の電源と組み合わせたハイブリッド駆動システムが、自動車や鉄道車両などで実用化されている[1][2]。蓄電装置を搭載することで、電気鉄道車両の運動エネルギーを回収・再利用することが可能である。本研究では、図 1 のような蓄電装置搭載電気車に着目し、架線と車両駆動回路を遮断器で分離した上で車載蓄電装置を用いてモータ電圧を昇圧し、図 2 に示すようにモータ性能を向上させるための車両駆動回路制御方法について独自に検討する。加速時では、図 2 のようにモータ性能を向上させることで加速時間を短縮し、走行抵抗によるロスを低減することで列車消費エネルギーの削減が可能となる[3]。一方、ブレーキ時もモータ性能向上によって回生ブレーキ力が増加し、より多くの回生エネルギーを回収可能となる。

本研究では、上記のモータ出力向上策の具体的実現方法について検討することで、蓄電装置搭載電気車の省エネルギー効果を最大化することを目的とする。

【参考文献】[1] M. Ogasa, "Application of Energy Storage Technologies for Electric Railway Vehicles-Examples with Hybrid Electric Railway Vehicles," IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering, vol. 5, Issue 3, pp. 304-311, (2010) [2] T. Saito, and K. Kondo, "Implementation method of loss observer to power controller for overhead line and supercapacitor hybrid electric railway vehicle," IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering, vol. 11, Issue S2, pp. S108-S115, (2016). [3] 木村, 古賀:「エネルギー最小を考慮した運転曲線の作成」, 計測と制御, Vol. 19, No. 10, pp. 972-978, (1980)

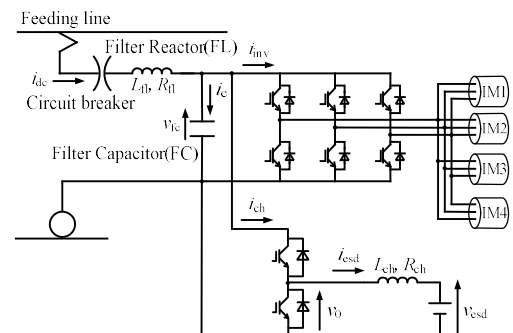


図 1. 蓄電装置搭載電気車の駆動回路構成

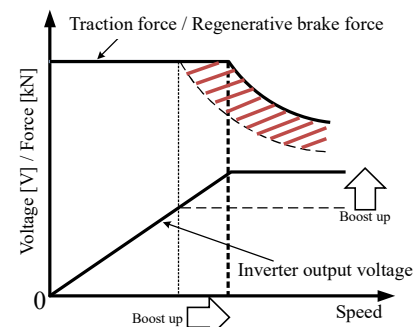


図 2. モータ電圧昇圧によるトルク向上

3. 研究内容及び成果

本研究で提案するモータ電圧昇圧による蓄電装置搭載電気車の省エネルギー化について、定量的な評価を実施した。これまでに、**図 3**に示すような DC リンク電圧の制御アルゴリズムを提案し、その有効性を静的な数値シミュレーションによって検証していた。提案アルゴリズムでは、加速および減速時に遮断器(High speed Breaker: HB)を開放し、DC リンク電圧を昇圧することで、モータトルクの向上を実現する(**図 3・Mode A**)。それと同時に、惰行時には架線を介して外部とエネルギーのやり取りを行うモードを設ける(**図 3・Mode B**)ことで、蓄電装置のエネルギーマネジメントを達成する。

提案制御法の有効性検証において、DC リンク電圧昇圧によって懸念されるパワーデバイスの損失やモータ損失(銅損・鉄損)をモデル化し、評価に加えている。特に、本手法ではモータ電流の増加が懸念事項として挙げられるため、モータ損失(銅損・鉄損)のモデルを用いて損失計算を行った。検討に用いるパワーデバイスとして、一般的に直流電気鉄道車両駆動システムに用いられる 3.3kV 耐圧 IGBT に加え、それよりも高耐圧である 4.5kV 耐圧 IGBT・6.5kV 耐圧 IGBT の適用も考慮し、より幅広い電圧範囲で昇圧の効果を検証した。上記検討の結果、鉄道車両に一般的に用いられる 3.3kV 耐圧 IGBT を適用した場合において、耐圧の観点で限界の DC リンク電圧である 1950V まで昇圧することで、従来よりも約 11.7%の消費エネルギー低減効果があることを明らかにした(**図 4**)。

上記の基礎検討に加え、本年度は提案制御法の検証を目的とし、ミニモデル実験を実施した。**図 3**に示した車両駆動用回路制御モード遷移において、架線と車両駆動回路を遮断器によって接続・分離することが想定され、それに起因する車両駆動回路内の各部電流・電圧の振動が懸念される。そこで、**図 5**のようなミニモデル実験システムを構築し、**図 6(a)**に示したようにモータを駆動した際の提案制御法の挙動について検証を実施した。その結果、**図 6(b)**に示すように**図 3**に従って FC 電圧を制御することが可能であることを確認した。その結果、**図 6(c)**に示すように、高速域まで定トルク領域を伸ばすことが可能である。また、**図 6(d)**に示したように、Mode B によるエネルギーマネジメントを行うことで、1 サイクル走行で初期のエネルギーレベルまで戻すことが可能であることを示した。

Running state of the vehicle	Powering			Coasting	Braking			Stop
Speed range	Low	Middle	High		Low	Middle	High	
State of HB	Close	Open		Close	Open		Close	
Control mode	Mode C	Mode A		Mode B	Mode A		Mode C	

図 3. モータ電圧昇圧によるトルク向上のための車両駆動回路制御法
Mode A: DC リンク電圧昇圧
Mode B: 蓄電装置のエネルギーマネジメント
Mode C: 待機状態

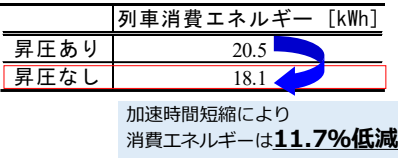


図 4. DC リンク電圧昇圧による列車消費エネルギーの変化

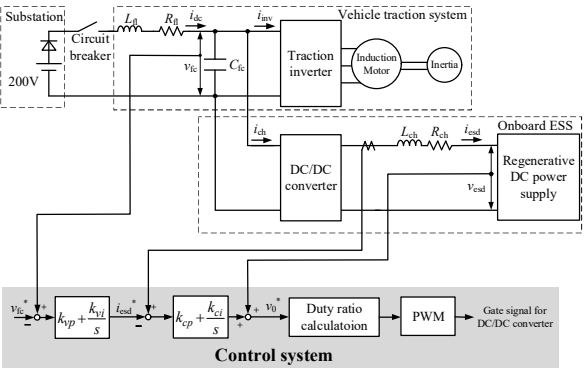


図 5. ミニモデル実験システム.

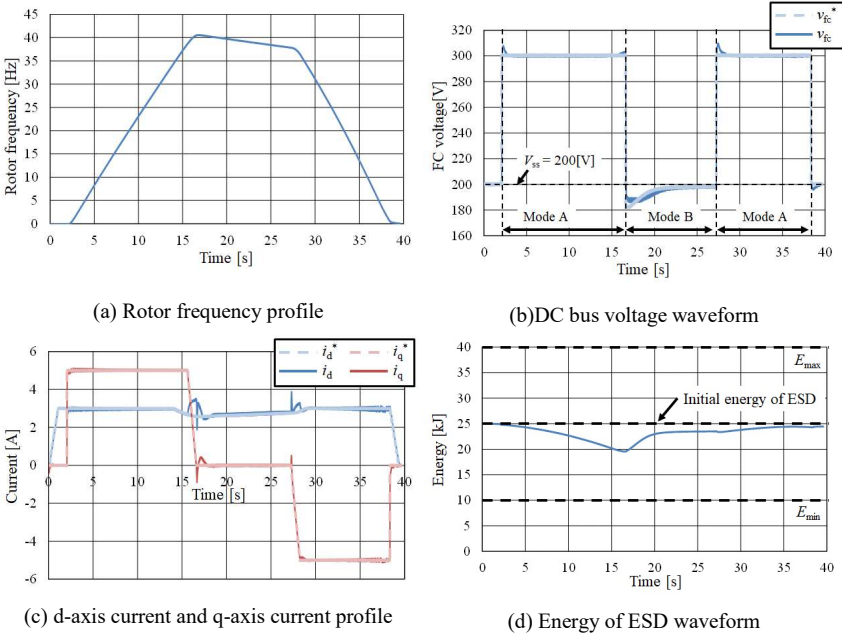


図 6. 提案する主回路制御法のミニモデル実験検証結果

4. 今後の研究の見通し

本研究の目的であるモータパワー向上による鉄道車両駆動の省エネルギー化のためには、DC リンク電圧を車両駆動回路のパワーデバイスの耐圧に近い電圧まで上昇させて動作させる制御手法の確立が重要である。特に、**図 3** に示した車両駆動用回路制御モード遷移において、架線と車両駆動回路を遮断器によって接続・分離することが想定され、それに起因する車両駆動回路内の各部電流・電圧の振動が懸念される。これまでの研究で、遮断器動作を含めた主回路制御法を提案し、数値シミュレーションとミニモデル実験によってその有効性を検証しているが、今後の課題として下記のような車上搭載蓄電装置の容量設計が挙げられる。

- 車上蓄電装置の容量設計

鉄道車両に搭載する蓄電装置のパワー・エネルギー容量設計に関しては、明確な設計法は未だ十分に明らかにされていない。移動体に搭載する蓄電装置容量は最小化することが望ましいため、提案する DC リンク電圧昇圧に必要な最小限の蓄電装置容量について下記のような検討を行っている。

車両に搭載する場合に重要な評価項目となる質量について、蓄電装置のハイブリッド化に着目し、質量計算を検討・実施した。蓄電装置の特性として、エネルギー密度が高いリチウムイオンバッテリー (LiB) と電気二重層キャパシタ (EDLC) を組み合わせることで、提案するモータ電圧昇圧に必要とされるパワー・エネルギー特性に適した電源構成が可能となる。各 ESD には**図 7** のように電力分配を行う想定とし、この条件下で LiB と EDLC それぞれに要求されるエネルギーを計算した。求めたエネルギー容量と質量エネルギー密度からシステム総質量を算出した結果を**表 1**に示す。ハイブリッド電源構成については、電力配分比を変化させて質量が最小となったケースにおける総質量を示している。なお、**表 1**における総質量の算出には、2 象限チョップ回路の質量も含まれている。**表 1**より、想定した条件下では LiB と EDLC を併用した構成が最も軽量となることが確認できる。本検討より、蓄電装置のハイブリッド化により総質量の削減が期待できることが明らかとなった。引き続き、最大限の省エネルギー化を実現する車両搭載蓄電システムの構成法および容量設計法について検討を行う予定である。

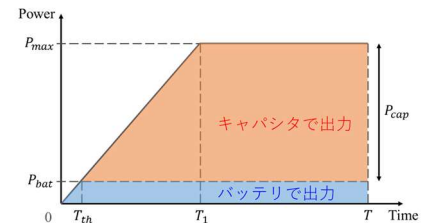


図 7. LiB と EDLC の電力配分

表 1. 電源構成による総質量の比較

電源構成	総質量 [t]
LiB 単体	2.096
EDLC 単体	2.986
LiB-EDLC ハイブリッド	2.086

これまで、**図 2** のような特性を実現するための具体的な車両駆動回路制御方法や蓄電システム容量設計法は未だ検討されておらず、本研究では上記の課題について独自に検討することで、蓄電装置搭載電気車の省エネルギー性を高めることに寄与する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読付)

- **Hiroyasu Kobayashi**, Masafumi Miyatake, Takafumi Koseki and Keiichiro Kondo: “A Method to Design Power and Energy Capacity of Onboard Energy Storage Device for Emergency Operation Based on Simple Formulation,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 12, No. 3. (Accepted)

国際会議(査読付)

- **Hiroyasu Kobayashi** and Keiichiro Kondo: “Control Method for Increasing Motor Power of DC-electrified Railway Vehicles with an Onboard Energy Storage System,” *IPEC2022*.
- **Hiroyasu Kobayashi**, Masafumi Miyatake, Takafumi Koseki and Keiichiro Kondo: “A Method to Design Capacity of Onboard Energy Storage Device for Emergency Operation Based on Effective Balance of Power and Energy,” *IPEC2022*.
- **Hiroyasu Kobayashi** and Tsutani Ryuichi, “Experimental Study on Control Method to Increase Motor Power of Rail Vehicle with Onboard Energy Storage System,” *EVTeC2023* (Under review).