

2020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)

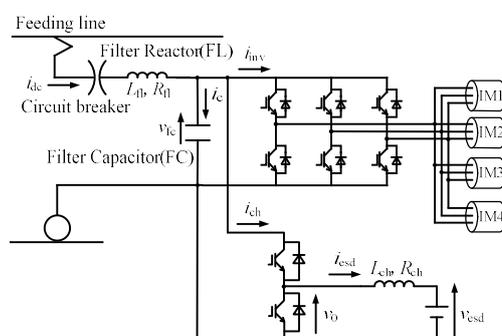


図 1. 蓄電装置搭載電気車の駆動回路構成

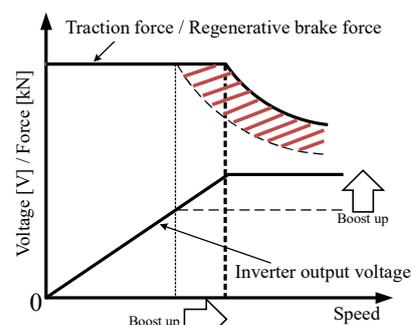


図 2. モータ電圧昇圧によるトルク向上

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。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 10% の消費エネルギー低減効果があることを明らかにしている。

上記の基礎検討に加え、本年度は駆動システムの動特性を考慮した数値シミュレーションを実施している。実車両を想定したシミュレーションの結果(**図 4**), **図 5(b)**に示した通り、DC リンク電圧が各制御モードの指令値に概ね追従できており、SOC も 1 サイクル走行で初期値に戻っていることから、**図 3** に示した提案制御法が適用可能であることを確認している。また、提案手法において、遮断器開閉に伴う突入電流の懸念があるが、**図 5(c)**に示した HB を流れる電流波形から、特に大きな突入電流は流れないことを確認している。しかし、**図 4**において架線から先に接続される負荷として想定しているのは、電圧変動のない変電所を想定した電圧源であり、現実で起こりえる電圧変動は考慮されていない。突入電流は HB 両端の電位差に大きく影響を受けると考えられるため、上記の電圧変動時における突入電流の挙動およびその対策については、次年度に引き続き検討することとする。

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

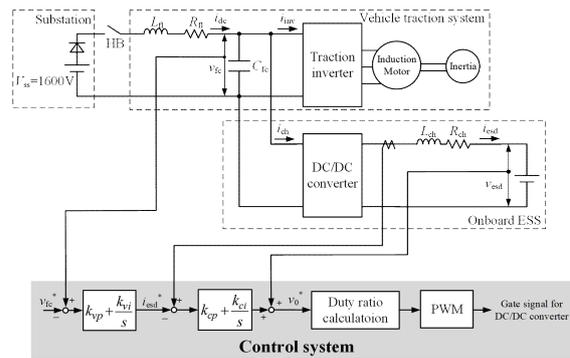
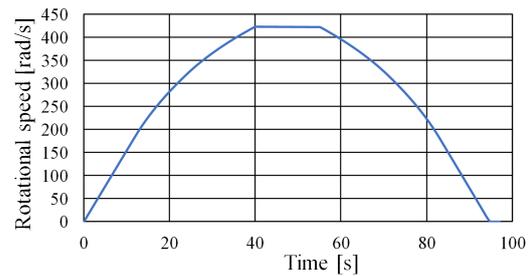
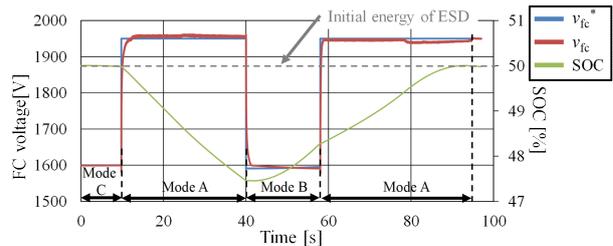


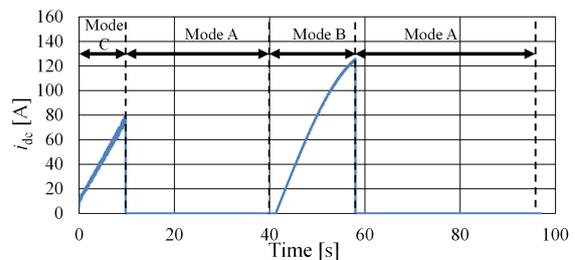
図 4. 想定システム図



(a) 想定するランカーブ



(b) 昇圧動作波形



(c) HB 電流波形

図 5. 実車両を想定したシミュレーション波形

4. 今後の研究の見通し

本研究の核にあた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とともに、車上搭載蓄電装置の搭載容量の設計も重要と考えられる。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。そこで、今後は下記 2 点について、検討を行う予定である。

- 突入電流を低減する車両駆動回路制御法の提案

モード切替時において、突入電流を最小限に抑制する新たな DC リンク電圧制御法について検討を行う予定である。遮断器開閉時に DC リンク電圧とパンタ点電圧の差が大きい場合、駆動回路に突入電流が流れたり、電流・電圧が振動する場合があることが課題として残されていた。これらは、駆動回路内の回路素子の破壊や、FC 電圧振動によるモータトルクの脈動を引き起こす懸念がある。そこで、モータ制御を含めた主回路制御を改良することで、突入電流の低減を実現する制御を考案する。

- 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検討を行う予定である。

なお、上記の検討内容については、最終的に数値シミュレーションとミニモデル実験によって、その妥当性を検証する予定である。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制御系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** and Keiichiro Kondo: “Control Method for Increasing Motor Power of DC-electrified Railway Vehicles with an Onboard Energy Storage System,” IEEJ Journal of Industry Applications, vol.10, No.5, pp. 520-527. (2021)

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*. (Under review)