

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	早稲田大学 理工学術院
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)

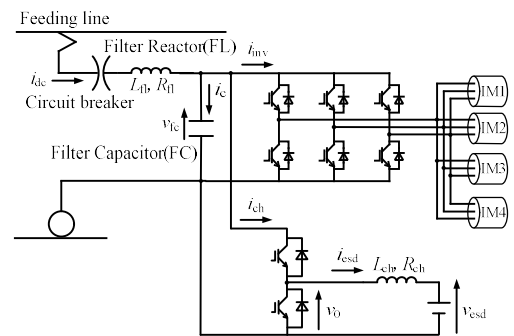


図 1. 蓄電装置搭載電気車の駆動回路構成

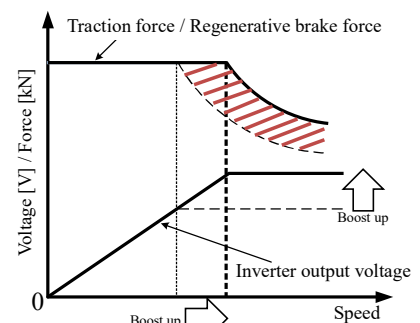


図 2. モータ電圧昇圧によるトルク向上

3. 研究内容及び成果

本申請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

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	

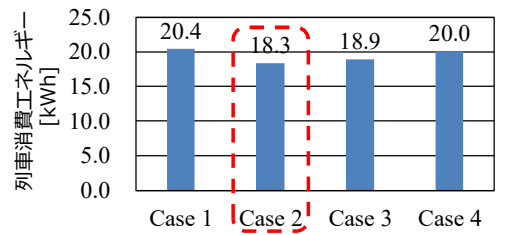
図 3. モータ電圧昇圧によるトルク向上のための車両駆動回路制御法
 Mode A: DC リンク電圧昇圧
 Mode B: 蓄電装置のエネルギーマネジメント
 Mode C: 待機状態

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。昇圧時の最大電圧と使用するパワーデバイスの関係は以下に記載するような組み合わせとした。それに加え、走行パターンが変化した際の省エネルギー効果を確認するため、1 駅間を走行するパターンに加え、複数駅間を走行するパターンも想定した。

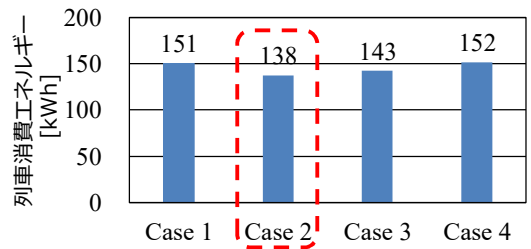
- Case 1. 昇圧なし(3.3kV IGBT)
- Case 2. 1950V (3.3kV IGBT)
- Case 3. 2500V (4.5kV IGBT)
- Case 4. 3500V (6.5kV IGBT)

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、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、1 駅間走行パターンでは従来よりも約 10.1% 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(a)**)。複数駅間走行時に関しても、Case1 に対して 8.87% の消費エネルギー低減効果を確認した(**図 4(b)**)。

上記の基礎検討に加え、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も実施している。実車両を想定したシミュレーションの結果(**図 5**)、**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。

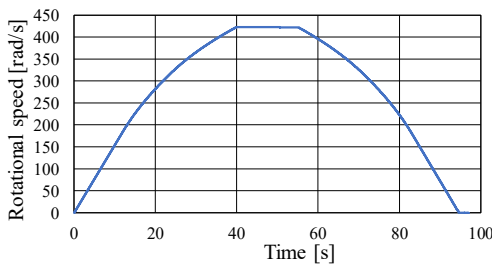


(a) 1 駅間走行時の列車消費エネルギー

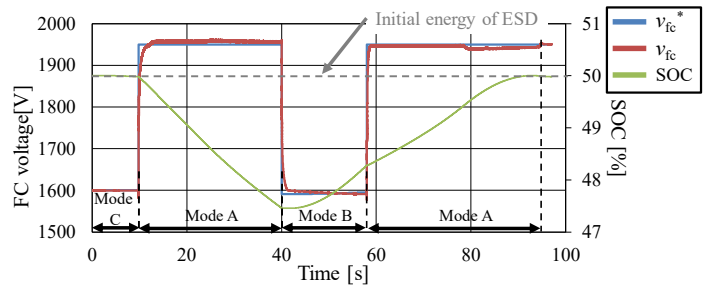


(b) 複数駅間走行時の列車消費エネルギー

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



(a) 想定するランカーブ



(b) 昇圧動作波形

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必要がある。そのためには、高精度な DC リンク電圧制御が必要不可欠である。その上、2019 年度成果で提案した車両駆動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。

- スムーズなモード切替制御法の確立
モード切替時において、振動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。
- 振動抑制及び高精度な DC リンク電圧制御器設計
上記のスムーズなモード切替制御法の確立とともに、モード切替時に発生した振動を抑制するための制御器設計や、過電圧を引き起こさない高精度な DC リンク電圧制御器の設計を行う予定である。

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 DC リンク電圧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一段と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: “A Novel Control Method to Increase Motor Power of DC-electrified Railway vehicle with Onboard Energy Storage System,” IEEJ transactions on IA. (査読中)

国際会議(査読付)

- **Hiroyasu Kobayashi** and Keiichiro Kondo:” A Novel Control Method of Parallel Connected Onboard Energy Storage System for DC-electrified Rail Vehicle to Increase Traction Motor Power,” *SPEEDAM2020*, Italy (2020.6)