

令和元年9月12日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06209

研究課題名（和文）蓄電装置搭載電気車の回生電力量向上方法の研究

研究課題名（英文）Study on a method to enhance the regenerative energy on railway vehicles with on board energy storage devices.

研究代表者

近藤 圭一郎 (Kondo, Keiichiro)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10425895

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、蓄電装置を搭載した電気鉄道車両において、架線と主回路を切り離し電動機電圧を向上する際の主回路機器制御方法と、寸法制約内での電動機回生電力を最大化するための主電動機設計法と、列車運転中にオンラインで電動機温度を推定しつつランカーブを最適化することで回生ブレーキパワーを増大する方法についてそれぞれ明らかにすることで、蓄電装置を搭載した電気鉄道車両の省エネルギー効果を限界まで高める方法を明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気駆動された移動体におけるエネルギー消費削減の方策の体系化することに寄与した。また、CO₂削減や化石燃料枯渇対策に寄与する研究成果を得た。

研究成果の概要（英文）：In this study, methods to enhance the regenerative brak energy for railway vehicles with on board energy storage devices are proposed and verified. My means of these methods, energy consumption on railway vehicle operation.

研究分野：パワーエレクトロニクス，モータドライブ

キーワード：回生ブレーキ 省エネルギー 鉄道車両 主回路制御 蓄電装置

1. 研究開始当初の背景

(1)電気鉄道はエネルギー効率の高い輸送機関として注目されており、一層の省エネルギー化が期待されている。そのための技術として、蓄電装置を車上に搭載し、回生ブレーキにより運動エネルギーを回収する技術が用いられている。図1は蓄電装置に二次電池(Battery)を、電源は直流架線システムを例とした主回路システムである。このようなシステムにおいて回生電力のさらなる増大のためには、インバータ入力電圧・電流量向上が有効である。

(2)これらのうち、電流増大については、電動機の電気装荷を増加させ、図2に示すような回生ブレーキ力向上策が一部で実用化されている。しかし、インバータの入力電流の大きさに対して、寸法制約内での誘導電動機の出力限界は明らかになっていない。

図1を対象としたインバータの入力電圧向上方策については架線と主回路を分離し、チョップで蓄電装置電圧を昇圧する方法などが考えられるが、具体的な制御方法などは検討されていない。

さらに、電動機の定格出力は想定した実際の運転パターンにおいてRMS電流を求め、これに基づいて決定するが、実使用では温度上昇限度の面から余裕があり、これを利用すれば更なる回生電力向上の余地がある。しかし、その具体的な方法は明らかとなっていない。

2. 研究の目的

前記の課題に対して本研究では、蓄電装置を搭載した電気鉄道車両において、架線と主回路を切り離し電動機電圧を向上する際の主回路機器制御方法と、寸法制約内での電動機回生電力を最大化するための主電動機設計法と、列車運転中にオンラインで電動機温度を推定しつつランカーブを最適化することで回生ブレーキパワーを増大する方法についてそれぞれ明らかにすることで、蓄電装置を搭載した電気鉄道車両の省エネルギー効果を限界まで高める方法を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1)平成28年度の実施方法

- ①架線の分離投入時の主回路機器制御法
- ②制約寸法内における誘導電動機出力最大化設計法
- ③オンラインRMS電流推定による電動機温度上昇推定法

のそれぞれについて、研究分担者間で連携しながら、それぞれで確立を目指した。

(2)平成29年度以降の実施方法

②の検討結果を含めて、①に続く“蓄電装置容量と省エネルギー効果の関係の明確化”と、①で検討した主回路機器設計法を前提とした②の検討の深度化と、①と②の検討結果を受けて、③に続く“温度上昇推定に基づく省エネルギー運転法の確立”を目指す。最後にこれらを総合的に実施した場合の省エネルギー効果について、シミュレーション・実験を交えて検証し、蓄電装置を搭載した電気鉄道車両の省エネルギー効果を限界まで高める方法を明らかにすることを期する。

4. 研究成果

4.1 架線の分離投入時の主回路機器制御法

(1)概要

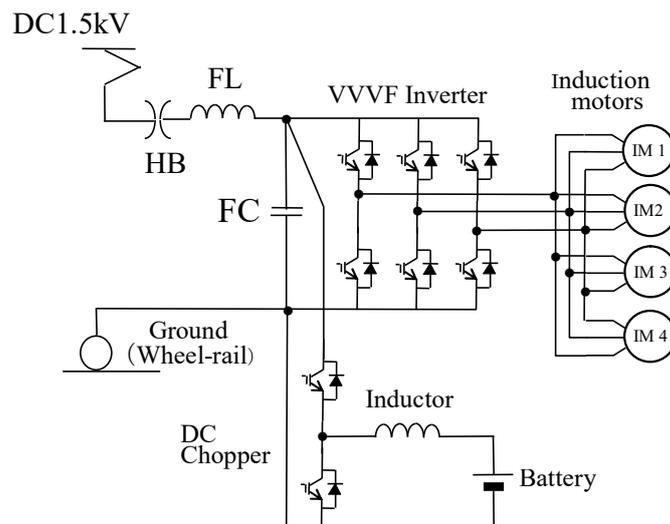


図1 蓄電装置搭載電気車主回路構成例

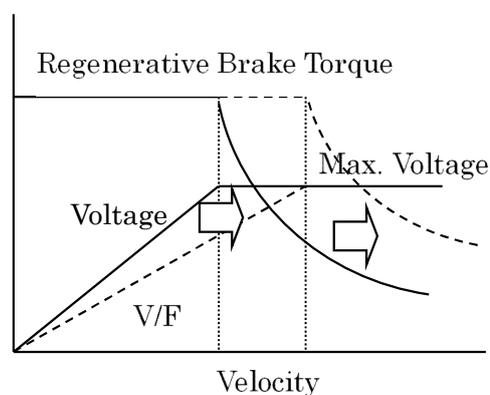


図2 電気装荷の増大による回生ブレーキ力の増加[2]

表1に示すような架線・蓄電装置ハイブリッド主回路システムについて検討を行う。一般には力行エネルギーに対して回生エネルギーが小さいため、有限の蓄電装置容量で連続的に力行アシスト・回生電力向上を行うためには、蓄電装置のエネルギーマネジメントが必要である。そこで本研究では、惰行時に、架線と車両主回路を再接続して蓄電装置のエネルギーマネジメントを行う手法を提案した。このとき、他の力行車。回生車は電流制御を行なっている。そこで、惰行時の蓄電装置の充放電制御はDCリンク電圧を蓄電装置の充電量によって制御する方法を適用する。

(2)提案制御法

以下の3つの制御モードを車両の走行状態に応じて切り替えることで、蓄電装置のエネルギーマネジメントを実現する。

Mode A では、HB を開放し、架線と車両主回路を切り離す。同時に、主回路のパワーデバイスの耐圧の範囲内でDCリンク電圧の昇圧を行い、モータ出力を上昇させる。一方、

Mode B では、HB を再投入し、架線と車両主回路を再接続する。この時、蓄電装置の充電状態に応じてDCリンク電圧を制御する。

Mode C では、架線と車両主回路が接続された状態で、蓄電装置は充放電を行わず、力行時には架線から直接電力供給を行う。

Mode B におけるエネルギーマネジメント方法について述べる。図3にMode BでのDCリンク電圧指令値決定法を示す。図3において、蓄電装置の貯蔵エネルギーに余裕がある領域Bでは、積極的な充放電は行わず、必要に応じて周囲の列車と蓄電装置の間で電力のやり取りを行う。一方、蓄電装置のエネルギー貯蔵量が下限に近付いている領域Aでは、DCリンク電圧を低下させ、架線からエネルギーを受け取ることで蓄電装置の充電を行う。また、蓄電装置のエネルギー貯蔵量が上限に近付いた領域Cでは、DCリンク電圧を上昇させ、蓄電装置から他列車へエネルギーを供給する。提案手法では、Mode AおよびMode Bにおいて、2象限チョップパによってDCリンク電圧を制御する。

(3)検証結果

提案した架線・蓄電装置ハイブリッド鉄道車両の主回路制御法について、数値シミュレーションを用いて有効性を検証した。以下に本検討で想定する4パターンでのDCリンク最大電圧 V_{dcmax} と、それぞれの場合に用いるパワーデバイスを示す。

Case 1: Device A (3.3kV 耐圧)

Case 2: $V_{dcmax} = 1950[V]$, Device A (3.3kV 耐圧)

Case 3: $V_{dcmax} = 2500[V]$, Device B (4.5kV 耐圧)

Case 4: $V_{dcmax} = 3500[V]$, Device C (6.5kV 耐圧)

蓄電装置については、直列数については一般的な直流電気鉄道車両の性能保証電圧(900V)を考慮して決定した。一方、並列数については蓄電装置に求められるパワー容量を満足するように決定した。また、表1に想定車両の諸元を示す。本シミュレーションにおける車両走行区間は1駅間を想定し、駅間距離は4kmとした。

表1. 想定した車両の諸元.

Parameters	Values
Capacitance of FC C_{fc} [mF]	13.2
Resistance of FL R_{fl} [Ω]	0.1
Resistance of reactor of DC/DC chopper R_{ch} [Ω]	0.1
Number of Motors	4
Mass of train [t]	77.9
Maximum acceleration ratio [km/h/s]	2.0
Maximum deceleration ratio [km/h/s]	3.6

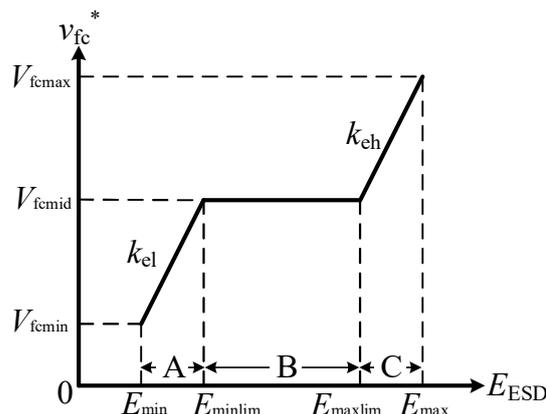


図3. 提案するDCリンク電圧制御法

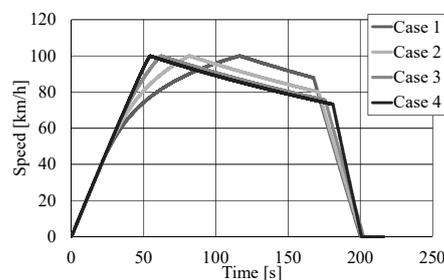


図4. 各ケースにおける走行パターン Case 1~Case 4.

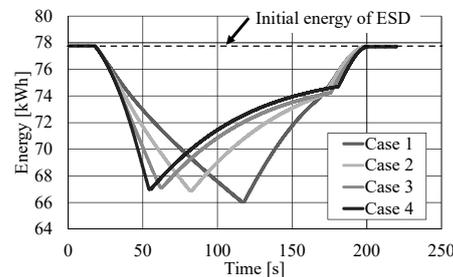


図5.各ケースにおける蓄電装置エネルギーの変化.

図4に各Caseにおけるランカーブを示す。この結果から、提案するエネルギーマネジメント法により、全てのCaseで惰行時に充電を行うことで蓄電装置の初期エネルギーと走行終了時のエネルギーが一致している。したがって、提案エネルギーマネジメント法を適用することで、過充電・過放電を防止し、複数駅間の連続走行が可能となる。また、表3に力行時の列車への総入力エネルギーから列車回生エネルギーを差し引いた「正味の列車消費エネルギー」のシミュレーション結果を示す。Case3が最も消費エネルギーが小さく、昇圧を行わないCase1に対して約7.8%の省エネルギー化が期待される。

表2 エネルギー消費のシミュレーション結果

	Total energy consumption
Case 1	9.49
Case 2	8.80
Case 3	8.75
Case 4	9.37

4.2 制約寸法内における誘導電動機出力最大化設計法

(1)出力密度向上法と限界を与える要因

今回対象とする誘導電動機は、首都圏で走行している通勤列車で実際に用いられている三相かご形誘導電動機で、これ以降ベース電動機と呼ぶ。ベース電動機の仕様を表1に示す。今回の検討では、外形寸法を一定とするため、鉄心内径、鉄心長をベース電動機から変更せず、図6に示すように、導体寸法を拡大することで出力密度向上を図る。

a) 固定子

電流を増やすことにより出力密度を向上する場合、銅損一定の条件から出力密度の限界は固定子巻線断面積の限界で決まる。以下図7を参照しながら説明する。固定子巻線の断面積の限界は、固定子鉄心ティース(Tooth)部の磁気飽和の観点から固定子スロット寸法により決定される。誘導電動機の固定子鉄心での磁束は極間のバックヨークに集中する。そのため、出力密度を向上するうえでバックヨーク(Back Yoke)の磁束密度が直接的な限界となる。

b) 回転子

かご形誘導電動機のトルクは、固定子巻線が作る磁束によって回転子導体棒に誘導される電流に、磁束が鎖交することによって発生する。そのため回転子導体に流れる電流を大きくすれば出力密度を向上できる。二次電流を増やすには、磁束(相互インダクタンスに比例すると仮定)とすべり角周波数の積を増やす必要がある。なお、このとき固定子磁束は減少していくことから、停動トルクが下がるので、それを補うだけのすべり角周波数の増加が必要である。また、固定子同様、銅損一定の条件から、電流を増やす場合には、導体断面積も比例して増加させる必要がある。以上から、二次銅損一定の条件の下で、停動トルク余裕の限界が、回転側の出力密度向上の限界と言える。

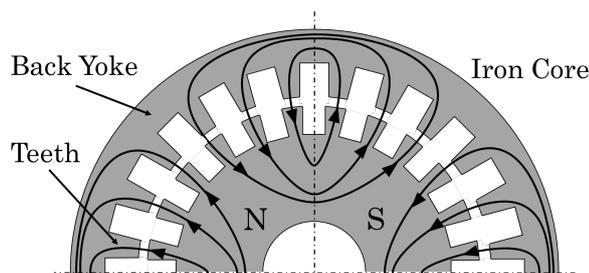


図7 誘導電動機磁束分布

表3 電動機寸法と等価回路定数(80Hz)の変化

				Conve tiona
density at stator teeth B_m [T]				0.90
ator teeth width b_t [mm]				12.8
tator slot width b_s [mm]				12.5
ction of stator winding S_1 [mm ²]				15.0
section of rotor bar S_2 [mm ²]				196
section of end ring S_3 [mm ²]				700
winding resistance R_1 [Ω]				0.16
onductor resistance R_2 [Ω]				0.22
ding leakage reactance $x_{\sigma 1}$ [Ω]				0.81
ling leakage reactance $x_{\sigma 2}$ [Ω]				0.82
etizing reactance x_m [Ω]				15.5

(3)出力密度向上の限界とその結果

前項で示した方法で出力密度を最大化した電動機(改良型電動機)のベース電動機からの寸法と等価回路定数の変化を表4に示す。スロ

ットの幅の増加により固定子巻線断面積を増加でき、電流を増加することが可能であると言える。また、出力密度を向上した改良型誘導電動機を用いた場合の車両の速度-トルク特性を図7示す。図7より定トルク領域がより高速域まで広がり、出力密度が向上されていると言える。今回の検討ではベース電動機の固定子鉄心ティース部磁束密度を考慮して、ベース電動機の固定子外径は変更せず、固定子鉄心ティース幅を0.71倍にすることで固定子鉄心スロット幅を1.4倍程度まで増加できた。スロット幅の増加による巻線断面積の増加とすべり角周波数の動作点の変化により誘導電動機電流が191[A]から263[A]まで増加された。また、誘導電動機電流の増加により定トルク領域終端速度を48[km/h]から63[km/h]まで延ばすことができた。

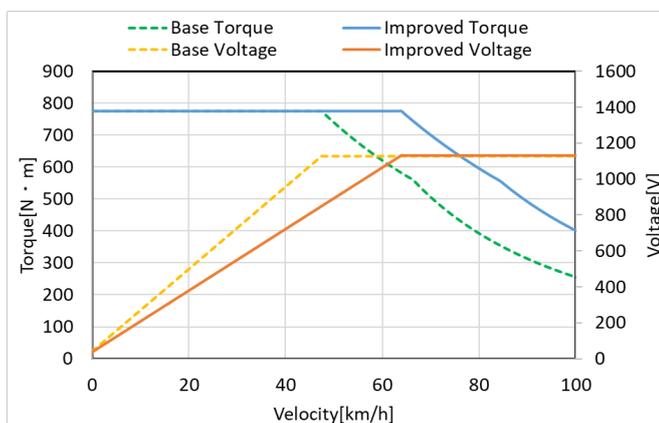


図7 誘導電動機を用いた車両トルク特性

増加された。また、誘導電動機電流の増加により定トルク領域終端速度を48[km/h]から63[km/h]まで延ばすことができた。

4.3 オンライン RMS 電流推定による電動機温度上昇推定法

電気車の主回路機器の設計においては、負荷条件（荷重や路線の勾配、走行パターン）などから、電流の二乗平均（RMS）値を求め、これを定格電流とするのが一般的である。また主回路機器の定格は、インバータなど電力変換装置であれば、パワー半導体スイッチングデバイスの温度限界から、主電動機や主変圧器などであれば、絶縁種別で決まる温度上昇限界から、定格電流に合わせて設計を行う。このとき、負荷条件は例えば、満車200%乗車で計算したり、走行パターンも加減速が頻繁なケースで設計する。したがって、通常の運転では、主回路機器の電流は機器の熱的な面では余裕がある。そこで、この余裕がある場合には、その分、主回路電流を増加させることで、主回路性能向上による省エネルギー化が期待できる。

しかし、主回路機器には温度センサーなどを埋め込むことは営業車ではまずない。したがって、本研究では、温度上昇を知るべく、インバータなどの制御装置内で、これを推定することで、電流を熱的な限界まで流す方法を提案した。具体的な方法としては、各機器の熱時定数をあらかじめ設計値もしくは実測値によって求めた熱等価回路モデルを構築した、そして、これを用いて、インバータ出力（主電動機入力）電流の計測値と併せ、熱等価回路モデルをインバータに内包する。これにより、時々刻々の温度を推定し、限度までの程度に応じて、電流を向上し、出力向上を図る。

これまでの実績から、通常時であれば概ね10%程度は出力向上が可能であると考えられる。詳細は今後検討を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計7件）

- (1) 許琮援, 近藤圭一郎 “ハイブリッド電気自動車駆動系における直流リンク電圧制御系の外乱の周波数帯域を考慮した設計法” 電気学会論文誌 D, Vol. 139, No. 8(掲載決定)
- (2) 池田怜太郎, 近藤圭一郎, 古関隆章, 宮武昌史, “鉄道車両駆動用誘導電動機の出力密度向上のための設計法” 平成30年電気学会産業応用部門大会講演論文集(USB), No.5-36, pp.V-293~296, 2018
- (3) 小林宏泰, 近藤圭一郎, 古関隆章, 宮武昌史, “DCリンク電圧昇圧による架線・蓄電装置ハイブリッド鉄道車両の省エネルギー化に関する基礎検討” 平成29年電気学会産業応用部門大会講演論文集(USB), No.5-66, pp.V387-390, 函館アリーナ, 北海道
- (4) Hiroyasu Kobayashi, Keiichiro Kondo, Diego Iannuzzi, “A Theoretical Analysis on Dynamic and Static Characteristics of Control Strategies for Wayside Energy Storage System in DC electrified Railway” Proceedings on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS) and International Transportation Electrification Conference (ITEC), No.T3.2.4, Nottingham, UK, 2018,
- (5) Hiroyasu Kobayashi, Keiichiro Kondo, Diego Iannuzzi, “A Theoretical Analysis on Static Characteristics of Voltage Based Control Method and Current Based Control Invited Paper Method for the Wayside Energy Storage System in DC-Electrified Railway”, Proceedings on International Power Electronics Conference -ECCE ASIA-(IPEC-Niigata 2018), No.23H2-1, pp.2527-2533, (invited paper), Niigata, Japan, 2018

- (6) 大場 直樹, 宮武 昌史”固定閉塞式信号システムの影響を考慮した列車の省エネルギー運転曲線導出”, 電気学会論文誌 D 6, pp.282-290, 2018 年, 10.1541/ieejias.138.282
(7) 清水 龍, 古関隆章, 渡邊翔一郎, ”列車出発時間の調整による電力ピークカット手法の饋電回路を考慮した傾向分析”, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, 2018

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

早稲田大学 近藤研究室 <http://www.kondolab.eb.waseda.ac.jp/>

東京大学 古関研究室研究レポート <http://koseki.t.u-tokyo.ac.jp/report.html>

上智大学 宮武研究室 <http://miyatake.main.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：古関隆章

ローマ字氏名：Takafumi Koseki

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院工学系研究科

職名：教研究者番号 (8 桁)：20211899

研究分担者氏名：宮武昌史

ローマ字氏名：Masafumi Miyatake

所属研究機関名：上智大学

部局名：創造理工学部

職名：教授

教研究者番号 (8 桁)：30318216

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：小林宏泰

ローマ字氏名：Hiroyasu Kobayashi

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。