

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02133

研究課題名(和文) ピーク電力カットと回生電力量増加のための電気車駆動系の革新的な設計法と運転法

研究課題名(英文) Innovative design and operation methods of electric railway vehicle traction systems for peak power shaving and increased regenerative power

研究代表者

近藤 圭一郎 (Keiichiro, Kondo)

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) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：鉄道車両における誘導機駆動システムについて、1つ目は、速度-回生ブレーキ力特性において、定出力領域を導入することにより、高速域での回生ブレーキ力特性を向上し、省エネルギー化を図れることを明らかとした。併せて中速域ではピーク電力をカットし、遠方の力行車まで回生電力が送電できることを明らかとした。また、2つ目に、これらを実現するための誘導機の設計指針を明らかとした。3つ目に回生ブレーキ力向上を図った場合の回生ブレーキノッチによる運転特性向上と省エネルギー効果を明らかとした。以上のような速度-回生ブレーキ力特性を実現した場合でも誘導電動機が制御可能であることを検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄道は元々が省エネルギーでCO2排出量も少ないが、カーボンニュートラルが大きな社会課題となる中、一層の省エネルギー化が求められている。鉄道車両の低いエネルギー消費の源泉の1つが運動エネルギーを再利用する回生ブレーキの活用にある。本研究では回生ブレーキ特性の改善の余地を明らかにし、その性能を向上することで、鉄道のカーボンニュートラルへの貢献度をより一層高める点で社会的意義がある。また学術的には近年のワイドバンドギャップパワー半導体の高耐圧化や電動機の制御性向上を背景に、鉄道車両駆動における回生ブレーキ特性設計を革新する点で意義深い。

研究成果の概要(英文)：In this study, it revealed that the introduction of a constant power region in the speed vs. regenerative braking force characteristics can improve the regenerative braking force characteristics at high speeds and save energy. The first is that the introduction of a constant output region in the speed-regenerative brake force characteristics improves the regenerative brake force characteristics at high speeds and saves energy. In addition, it was found that peak power can be cut in the medium-speed range, and regenerative power can be transmitted to a distant power train. Secondly, the design guideline of the induction machine to realize the above was clarified, and thirdly, the improvement of operating characteristics and energy saving effect by the regenerative brake notch were clarified when the regenerative brake force was improved. Thirdly, the effect of the regenerative brake notch on the operating characteristics and energy saving was clarified.

研究分野：パワーエレクトロニクス, 電気機器

キーワード：電気鉄道 省エネルギー 主回路制御 誘導機特性

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

回生ブレーキ力は、誘導電動機やインバータの電流制限やすべり周波数制御精度などの点から、高速域では低減させる特性が長年採用されてきた。しかし、近年、SiC-MOSFET に代表される低損失パワー半導体素子の高耐圧化や、電磁界解析技術の進展による低すべりな誘導電動機の普及などにより、高速域の回生ブレーキ特性を向上できるようになった。このような背景を踏まえ、中速域のピーク電力は抑制して、遠方の力行車まで回生電力が送電できるようにした上で高速域の回生ブレーキ力を向上し、電気鉄道の省エネルギー効果を高めることができるようになった。

### 2. 研究の目的

本研究では以下の目的とする。

- ・速度-回生ブレーキ力特性において、図1に示すように定出力領域を導入することにより、高速域での回生ブレーキ力特性を向上し、省エネルギー化を図る。
- ・中速域ではピーク電力をカットし、遠方の力行車まで回生電力が送電できるようにする。
- ・これらを実現するための誘導機の設計指針を明らかとする。
- ・上記のような回生ブレーキ力向上を図った場合の回生ブレーキノッチによる運転特性向上と省エネルギー効果を評価する。
- ・以上のような速度-回生ブレーキ力特性を実現した場合の誘導電動機の制御性を検証する。

これらを通じて、電気鉄道のさらなる省エネルギー化に寄与する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 省エネルギー化を実現する誘導機設計とその効果検証

図1のような特性を実現するため、定出力特性を拡大した低すべり誘導機の設計法の検討と、特性改善時の省エネルギー効果の検証を行った。具体的には、図2に示すような直流電気鉄道路線において、10両編成の列車14本が40分走行した場合について、図3のような回路モデルを想定し、省エネルギー効果の検証を行った。

#### 3.2 ピーク電力カット効果検証

3.1のシミュレーションにおいて、同時に軽負荷回生制御機能を用いた回生ピーク電力カット機能を検証する。

#### 3.3 回生ブレーキノッチの適用法検討と効果評価

図4に示すような回生ブレーキノッチを用いた場合の運転方法の検討を行う。併せて、図1のような方法を適用した場合の効果を評価する。

#### 3.4 2.2kW クラスミニモデルによる誘導機の制御性検証

ミニモデル誘導電動機駆動システムを用いて、高速域の回生ブレーキ力を向上させた特性の誘導電動機について制御性を検証する。

### 4. 研究成果

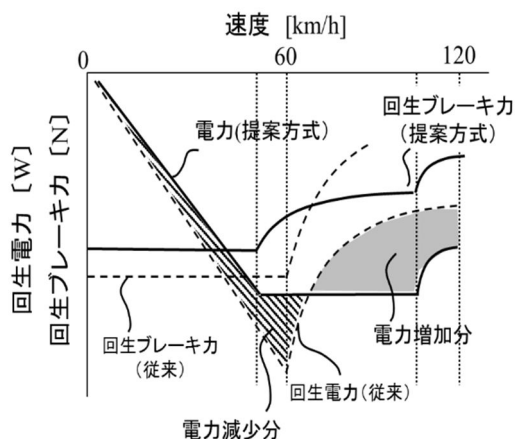


図1 提案する回生ブレーキ特性

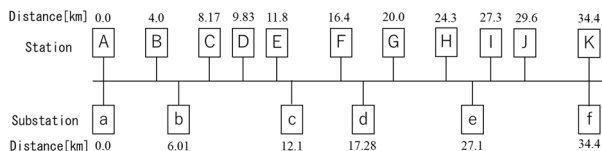


図2 想定する路線[1]

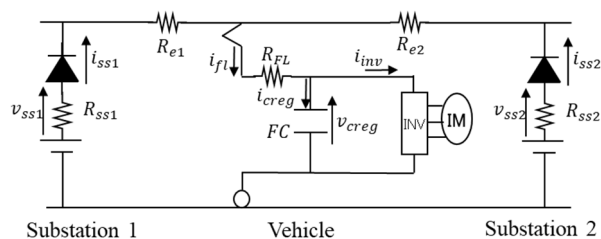


図3 消費エネルギー計算回路モデル[1]

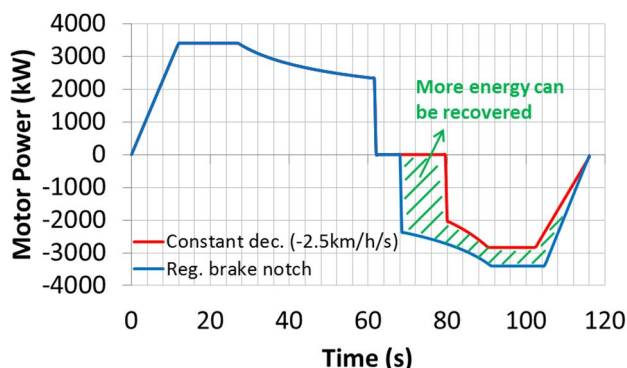


図4 回生ブレーキノッチによる出力特性[2]

#### 4.1 誘導機設計法と省エネルギー効果

定出力領域を拡大し省エネルギー効果を実現するためには、誘導機は相対的に「高すべり・低V/F特性」の設計とすればよいことを明らかとした。

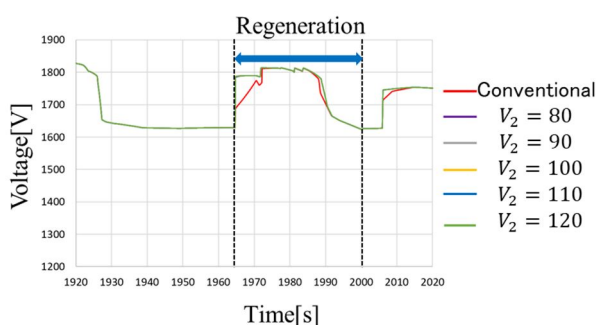
省エネルギー効果については、表1に示すように、変電所出力エネルギーは最大で0.341%の省エネルギー効果が得られ、回生ブレーキ性能向上の省エネルギー化へのインパクトが定量的に明らかとなった。

表1 回生ブレーキ力向上による省エネルギー効果

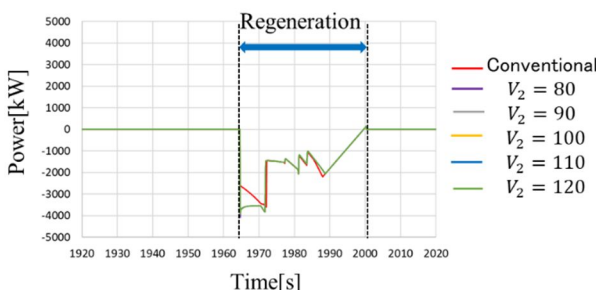
	Substation a	Substation b	Substation c	Substation d	Substation e	Substation f
Output energy (Conventional) [kWh]	361.35	561.71	711.72	1026.4	1011.3	415.08
Output energy (Proposed, $V_2=120$ ) [kWh]	361.11	559.79	710.77	1024.3	1009.1	414.39
Decreasing rate [%]	0.0675	0.341	0.133	0.198	0.213	0.165

#### 4.2 ピーク電力カット効果

図5から軽負荷回生制御による中速域のピーク電力低減効果が期待できることと、中速から高速域にかけて回生電力が一様になり、ピーク抑制効果が期待できることが分かった。

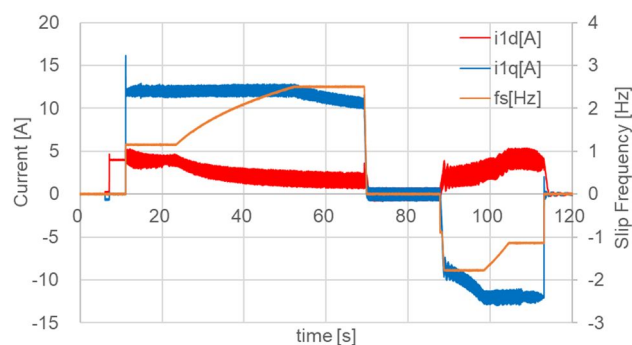


(a)FC voltage

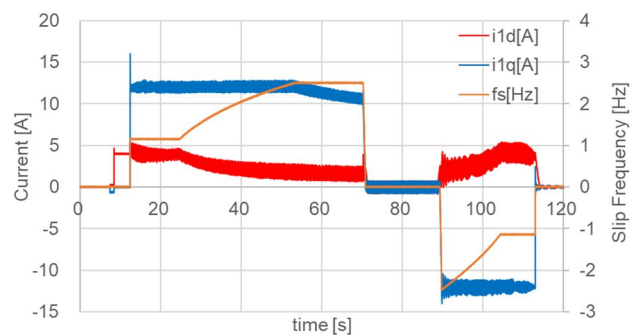


(b)Power

図5 回生ピークパワーカーット効果[1]



(a)Conventional



(b)Enhanced characteristics

図6 誘導電動機制御性の検証結果

#### 4.3 回生ブレーキノッチ適用時の運転法の評価

図4に示すように回生ブレーキノッチ適用時には、従来の回生ブレーキ力特性でも、速度に対して比較的フラットな回生電力特性であることがわかる。この事実から、高速域の回生ブレーキ性能を向上することで、中高速域で一様な回生ブレーキパワーとなり、運転支援などによる操作性向上が必要であることがわかった。

#### 4.4 高速域の回生ブレーキ力を向上させた特性の誘導機の制御性の検証

図5の結果から、すべり周波数が全般的に向上しても、停動トルク余裕を削り、高い回生ブレーキ力を広い速度範囲で維持できることが、実際に近い動作条件で検証することができた。すべりを減じ、電流を増加させても誘導機の制御性に影響がないことが実証できた。

#### 引用文献

[1] 大畑, 明比, 谷口, 近藤, 古関, 宮武 “鉄道車両駆動用誘導電動機における高速域の回生ブレーキ力増加による電系を考慮した回生エネルギー向上の評価” 令和4年度電気学会産業応用部門大会予稿集 (投稿中)

[2] F.Pandu WIJAYA, S.WATANABE\*\*, T.SAITO\*, H.KOBAYASHI, and K. KONDO\* “Advantages and technical issues of regenerative brake method at all over the speed range” Mechanical Engineering Journal, Vol. 1/4 No.1, p. 16-00473 (2017)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 明比大典, 谷口晴城, 近藤圭一郎, 古関隆章, 宮武昌史
2. 発表標題 鉄道車両駆動システムにおけるピーク電力を抑制しつつ 回生エネルギーを維持する 誘導電動機の世界速度 ブレーキ力特性
3. 学会等名 電気学会 モータドライブ, 回転機, リニアドライブ合同研究会 (オンライン, 予稿あり), MD-20-120, RM-20-113, LD-20-018
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 明比大典, 谷口晴城, 阿部由希帆, 近江卓杜, 近藤圭一郎, 古関隆章, 宮武昌史
2. 発表標題 定出力領域拡大時の回生ブレーキ力特性における軽負荷回生制御の深さと回生エネルギーの評価
3. 学会等名 電気学会 リニアドライブ, 交通電気鉄道合同研究会 (オンライン, 予稿あり), LD-21-009, TER-21-009
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田怜太郎, 近藤圭一郎
2. 発表標題 駆動用インバータと誘導電動機の統合設計による出力密度最大化
3. 学会等名 令和元年電気学会産業応用部門大会 No.5-74(予稿あり)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichiro Kondo
2. 発表標題 History and Future of power electronics technologies for railway vehicle traction
3. 学会等名 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大畑遼恭, 明比大典, 谷口晴城, 近藤圭一郎, 古関隆章, 宮武昌史
2. 発表標題 鉄道車両駆動用誘導電動機における高速域の回生ブレーキ力増加による電系を考慮した回生エネルギー向上の評価
3. 学会等名 令和4年電気学会産業応用部門大会(予稿あり)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	古関 隆章  (Koseki Takafumi)  (20211899)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授   (12601)	
研究分担者	宮武 昌史  (Miyatake Masafumi)  (30318216)	上智大学・理工学部・教授   (32621)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------