

操作遅延を考慮した省エネルギー運転支援の現車試験成果と課題

渡邊 翔一郎* 楊 哲 古関 隆章 (東京大学)
近藤 圭一郎 (千葉大学)
水間 毅 (交通安全環境研究所)
濱崎 康宏 (新京成電鉄)

Advantages and Resolution Practical Problems about On-Track Test of Energy-Saving Operation Assistance Considering Reduction for Delay Time

Shoichiro WATANABE*, Zhe YANG, Takafumi KOSEKI, (The University of Tokyo)
Keiichiro KONDO, (Chiba University)
Takeshi MIZUMA, (National Traffic Safety and Environment Laboratory)
Yasuhiro HAMAZAKI, (Shin-Keisei Electric Railway Co.,Ltd.)

This paper presents a manual train operation assistance method concerning power-limiting brake for energy-saving on train operation. Braking assistance command would be generated from a “dictionary” preparation to improve the regenerative availability, together with safety and keeping regular running time. In order to consider the power limiting effectively and resolve assistance operation problems focusing on delay time, this method has been checked on revenue service line.

キーワード：直流電気鉄道，回生ブレーキ，省エネルギー，電力制限ブレーキ，現車試験，運転支援 (DC-Electrified railways, Regenerative brake, Energy-saving, Power-limiting brake, On-track test, Assistance operation)

1. はじめに

回生ブレーキの利点として回生電力による省エネルギー化や操作性と乗り心地の向上などが挙げられるが，回生失効という大きな問題を背後に抱えている。これにより，回生ブレーキ本来の性能が十分に発揮されていないのが現状である。しかし，運転方法を工夫することによって回生電力の効率的な利用を実現できることが知られている⁽¹⁾。そこで筆者らは他車が効率的に回生電力を利用できるように，運転曲線の最適化研究の成果として知られている最大力行，惰行，最大制動という考え方に高速域で弱いブレーキを積極的に用いる電力制限ブレーキを考案し，さらに運転操作の問題を解決するため操作遅延を考慮した運転支援装置を用いた現車試験を行った。

2. 省エネルギー運転とは

〈2・1〉2つの省エネルギー運転法と回生ブレーキの優位性
まず省エネルギー運転とは，運転ダイヤで定められた走行時分を守りつつ，最も少ないエネルギーで駅間を走行す

る運転を言う。この運転手法は次の2つである。

- (I) ノッチオフ速度を下げ，強いブレーキをかける
- (II) 回生ブレーキのみで制動を得られるように(機械ブレーキを立ちあげないように)ノッチオフ速度を下げずにブレーキを早い時点からかけはじめる

これらの運転方法を取り入れた場合の運転曲線を図1に示す。(I)ではノッチオフ速度を下げた分を強いブレーキをかけて補い，(II)では(I)のブレーキよりも緩い回生ブレーキのみを使って時間がかかった分を最初の力行で補っている。まずこれらの2つの運転手法について，どちらが省エネルギー効果が高いのかを比べると，回生失効しない場合では(II)の運転手法のほうが，省エネルギー効果が大きいことがわかっている⁽²⁾。そこで本稿では，周囲の列車状況を把握できないという一般的な条件下で，1列車ができる最大限の省エネルギー効果を狙い，機械ブレーキを立ち上げず，回生ブレーキで多くの制動力を得る運転手法によって得られた成果と課題を報告する。

〈2・2〉回生ブレーキの有効活用法

一般的に，回生ブレーキを備えた鉄道車両は電空協調ブ

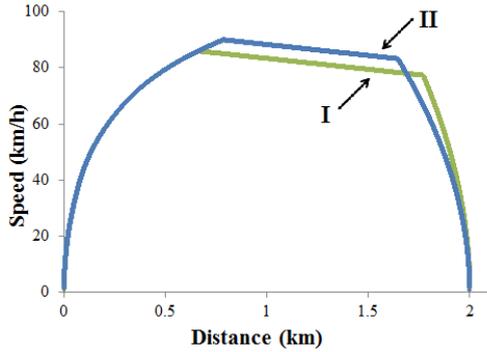


図 1 走行時分を守って省エネルギー運転を実現した場合の運転曲線

Fig.1. Possible running curves for energy-saving operation in a standard running time.

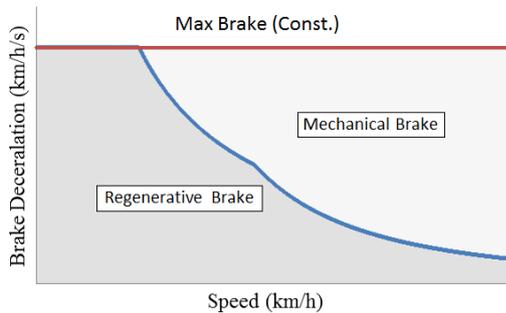


図 2 電空協調ブレーキ制動で減速度を得る時の機械ブレーキと回生ブレーキの負担の割合

Fig.2. The ratio of mechanical brake and regenerative brake when a train uses cooperative brake.

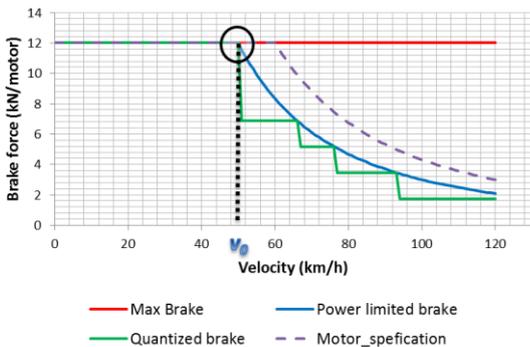


図 3 モータ性能とブレーキ力の関係

Fig.3. Relationship between motor performance and brake force.

レーキにより回生ブレーキと機械ブレーキをあわせて制動力を得るが、遅れ込め制御により回生ブレーキに優先的に制動負荷がかかるように工夫されている。図 2 にそのブレーキの負担割合を示す。機械ブレーキを立ち上げずに回生ブレーキだけで制動する、つまり回生性能曲線に沿ってブレーキをかける操作を実現することが本稿の狙いである。

〈2・3〉回生電力有効活用のための電力制限ブレーキ

図 3 の回生ブレーキの制動力と速度の関係を見れば、高速域で回生ブレーキを利用し、かつ強い制動力を得ようと

すれば非常に大きな回生電力を生み出していることがわかる。したがって、筆者らは機械ブレーキを立ち上げずに回生ブレーキだけで駅に止まるという目的に加え、回生絞込みを抑えるための工夫として図 3 の V_0 を小さくして最大パワーを抑えるブレーキ制動手「電力制限ブレーキ」を考えた。これだけでは完全に回生絞込みや回生失効を防ぐことはできないが、周辺の列車と情報通信して路線状況などを把握することができない一般的な条件においては最大の効果を得るものである。そして、後に述べる運転支援のために、ブレーキを離散化したノッチ指令を考える。

3. 運転支援の提案

〈3・1〉省エネルギー運転の難しさ

一般的な運転士は、列車が次駅でオーバーランしないように惰行距離を縮めて早めに強いブレーキを掛けて速度を落とす運転方法を行う。しかし、省エネルギー運転で扱う電力制限ブレーキは高速域で早めに緩いブレーキをかけ、速度が低下すると徐々に強いブレーキを入れるという方法で一般的な操作方法とは大きく異なる。加えて、列車速度により回生制動力が異なるため運転士によるマニュアル運転では実現は難しい。そこで本稿では、ブレーキ制動時に速度制限があるような複雑な路線であっても、運転士のマニュアル操作で省エネルギー運転が実現できる運転支援手法を提案する。

〈3・2〉運転支援方法のための列車情報の取得

この運転支援では列車の速度、位置、走行時間、き電電圧をリアルタイムに収集する。そして、列車の将来の運転状態を比較的正確に推測し、運転士にノッチ操作の指示を出す。

〈3・3〉支援意志の決定

本稿の支援意志の決定とは、リアルタイムに収集した列車の走行情報から基準運転時分以内に駅に到着し、かつオーバーランすることなく駅に安全に停止するための最も緩いブレーキパターンを決定することである。この決定は迅速に行わなければならないため、予め支援開始点での速度と残り時間に応じたブレーキパターンを複数用意し、速度と時間を index にした「ブレーキ辞書」を準備しておく。しかし、支援開始位置を多く設けるとデータ量が膨大になり迅速に意思決定ができなくなるため、支援開始点は数カ所にとどめておく。ここで、支援開始点を複数設定する理由は雨や風などの天候はじめ外乱要素による影響をその都度補正し駅の到着時間と停止位置を確実にするためである。

〈3・4〉ブレーキ操作支援の方法

本稿でのブレーキ操作支援とは、決定したブレーキパターンに沿って列車を走らせるために、図 3 で離散化したブレーキノッチ操作を運転士に伝達することである。運転士が円滑に運転支援の指令を受け取ることができるように、できるだけ操作が簡単で、連続する操作には一定の間を開けるなどの工夫をした。そして、運転台の側に支援モニタを設置し、直感的にノッチ操作ができるようにした。また、音声スピーカからも雑音の中でも聞き取りやすい女性の声で

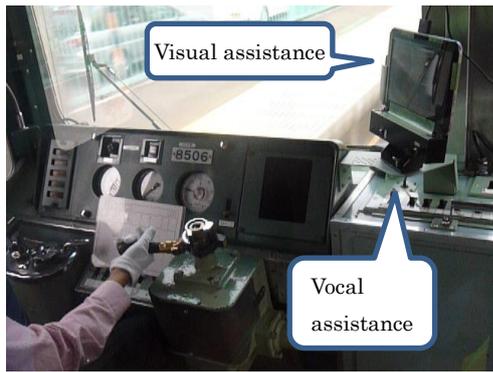


図 4 運転支援の様子

Fig.4. The situation of operation assistance.

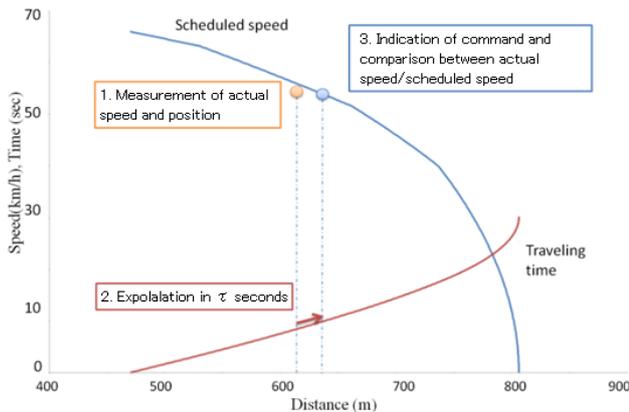


図 5 遅延時間を低減するための先読み手法

Fig.5. The method of reduction for delay time.

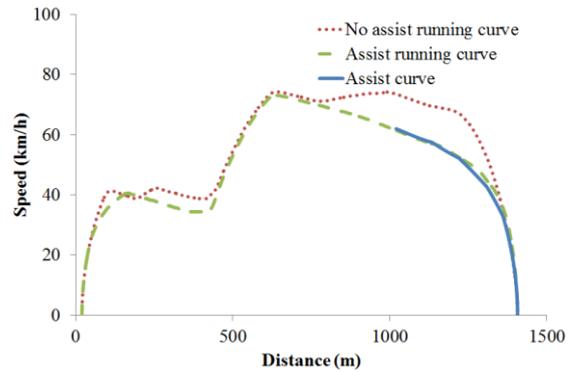
指令を読み上げるようにし、ノッチ指令は普段の運転士の習慣に合わせ、ノッチ操作範囲の3段階に絞った。運転支援の様子を図4に示す。

〈3・5〉 操作遅延時間低減の工夫

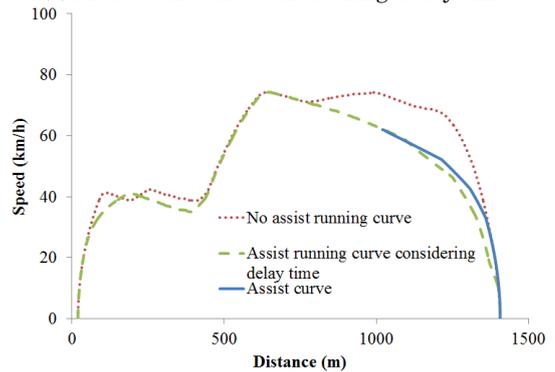
列車の走行状態に応じて適切な指令信号を運転士に知らせても、その操作を実行するのは人の手であるため、コンピュータの判断から列車の駆動装置までの伝達に遅延時間が生じ、これが操作遅延時間となる。ブレーキ支援の長いこの区間では、この遅延時間により高速で走る列車では数十mの支援開始位置のずれが生じてしまう。そこで本研究では列車の反応時間に応じて支援指令を先読みし、運転士に伝達する仕組みを取り入れた。支援先読みの手法を図5に示す。実際の列車速度と位置を測定し、その位置で計画時間より予め決めておいた遅延時間だけ先の計画速度を現在の速度と比較し、両者が一致するなら支援指令を送り運転支援を開始する。その支援指令の先読み機能により遅延時間の影響を抑え、列車を計画通りに走らせられるようにした。

〈3・6〉 運転支援の安全性の確保

本研究の運転支援では安全面に十分な配慮をするために運転操作系に直接介入していない。また、支援指令のブレーキ力を最大の70%とし、支援指令で停止位置に止まることができない不測の事態に備えてより強いブレーキ力を温存した。



(a) Assist curve not considering delay time.



(b) Assist curve considering delay time.

図 6 単調な区間における平常時と運転支援時の運転曲線と運転支援曲線

Fig.6. Assistance, non-assistance and assistance pattern running curves under normal course.

4. 基本的な電力制限制動支援とその効果の実証

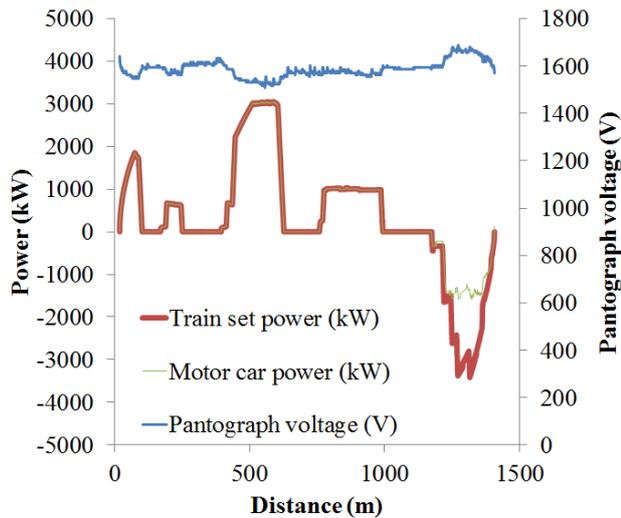
〈4・1〉 試験環境

筆者らは、新京成電鉄の新津田沼駅-前原駅間において現車試験を行い、比較的単調なブレーキパターンでの省エネルギー運転を運転士によるマニュアル操作で実現する運転支援の効果を検証した。なお、試験車両がセルフラップ式ブレーキハンドルという特徴に合わせて支援モニターは扇型の図を表示するようにした。

表 1 現車試験結果

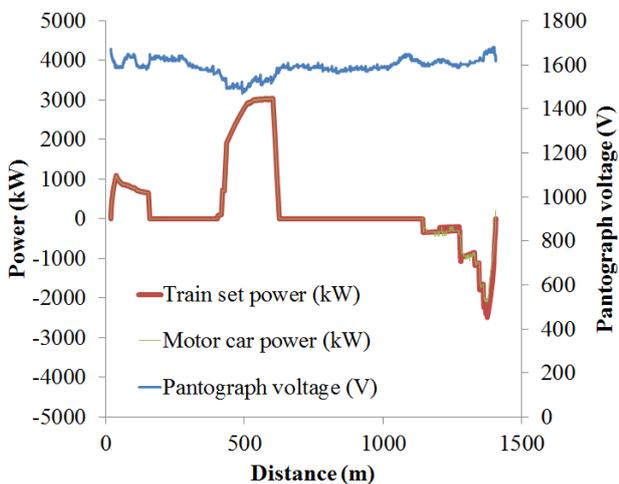
Table 1. Results of on-board test.

Assistance pattern	No assistance	Assist	Assist considering delay time
Running time [sec]			
Basic running time is 120s.	106	113	119
Acceleration energy [kWh]	16.54	13.00	13.45
Braking energy [kWh]	-9.48	-6.21	-6.38
Regenerative energy [kWh]	-5.60	-5.45	-6.17
Percentage of regeneration [%]	59.05	87.76	96.56



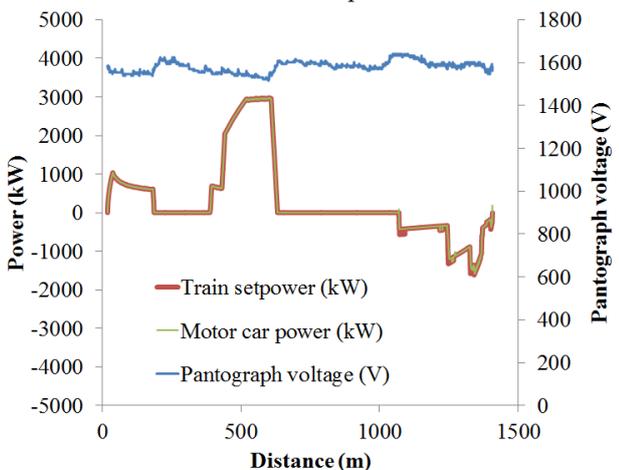
(a)通常時

(a)Normal operation



(b)運転支援時

(b)Assistance operation



(c)操作遅延を考慮した運転支援時

(c)Assistance operation compensating delay time

図7 ブレーキパワーとパンタ点電圧の変化

Fig.7. Brake power and pantograph voltage in different operations.

〈4・2〉 運転曲線で見える運転支援の効果

図6に運転士が平常通り運転した時の運転曲線と(a)に運転支援を行った場合の運転曲線、(b)に操作遅延を考慮した運転支援を行った場合の運転曲線ならびに支援曲線を示す。横軸の距離は営業キロである。支援した運転曲線では、支援なしの運転曲線に比べて制動時に緩いブレーキをかけており、特に(b)の操作遅延を考慮した運転支援では支援曲線より膨らむことなく確実な制動が得られている。図7の(a)(b)(c)で運転士が平常通り運転した時、運転支援を行った時、操作遅延を考慮した運転支援を行った時のブレーキパワー、架線電圧を比較した。図7(a)の1200m付近を見ると制動パワーが大きく、回生絞り込みにより機械ブレーキが大きく立ち上がっている。一方で図7の特に(c)を見ると、制動パワーが小さく抑えられ、架線電圧上昇が抑制されていることで有効な回生が得られている。

〈4・3〉 走行時分と回生率で見える運転支援の効果

表1を見ると、走行時分は基準運転時分内に収まっている。操作遅延を考慮した本運転支援手法は効果的であり、省エネルギー効果が大きいことが回生率データからわかる。

5. 知見と今後の課題

〈5・1〉 省エネルギー効果と運転支援の実用性

今回の現車試験では、運転支援システムによる電力制限ブレーキを用いた省エネルギー運転に操作遅延を考慮したことで、総走行時分を守りながら制動時の最大回生電力が低減し、高い回生率を達成することができた。

〈5・2〉 今後の課題

架線電圧情報による回生負荷推定に基づく運転支援もあり得る。また制動区間に強い速度制限のある区間でも提案の運転支援がうまくいくことがわかっている⁽³⁾。今後はATOへのこの電力制限ブレーキの導入を検討する。

なお、本研究は(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」平成22年度採択課題(2010-04)「持続可能な低コスト・省エネルギー鉄道のためのパワーマネジメント」の一環として行われている。(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の御支援に感謝する。

文 献

- (1) 濱崎康宏:「新京成電鉄における省電力への取り組み」, 鉄道車両と技術, No.196, pp.15 (2013)
- (2) Shoichiro WATANABE, Zhe YANG and Takafumi KOSEKI: "Analysis of the Relationship between Energy Consumption and Train Running Time Depending on Different Energy-Saving Train Operation Method", The Papers of Joint Technical Meeting on "Transportation and Electric Railway" and "Physical Sensor", IEE Japan, TER-13-005, PHS-13-009, p.25 (2013)
- (3) 渡邊翔一郎, 楊 哲, 古閑 隆章, 水間 毅, 濱崎 康宏:「直流電気鉄道の電力制限ブレーキ支援現車試験—省電力効果の実証と問題点の解決法—」 平成25年度電気学会産業応用部門全国大会, 5-34, 2013年8月