

3416 直流電気鉄道の省電力運転のための ブレーキ力制御と運転支援の提案

学 [電] ○楊 哲 (東京大) 学 [電] 渡邊 翔一郎 (東京大)
 正 [電] 古関 隆章 (東京大) 正 [電] 水間 毅 (交通安全環境研究所)
 非 [機] 濱崎 康宏 (新京成電鉄)

Proposal of train operation assistance for energy saving of DC-electrified trains

Zhe YANG*, Shoichiro WATANABE, Takafumi KOSEKI, Univ. of Tokyo
 Takeshi MIZUMA, National Traffic Safety and Environment Laboratory
 Yasuhiro HAMAZAKI, Shin-Keisei Electric Railway Co., Ltd.

This paper presents a manual train control assistance method for braking power-limiting energy-saving train operation. Braking assistance command would be generated from a “dictionary” prepared in advance to improve the regenerative braking availability, together with a safe and timekeeping stopping. The parameters of the proposed mechanism are discussed, and the energy saving effect is examined in a simulation.

Keywords : energy saving, DC-electrified train, operation assistance

1. はじめに

パワーエレクトロニクス技術の進歩により、1968年に回生ブレーキ車が初めて量産化⁽¹⁾し、現在では、回生ブレーキ車が電車全体の75.7%を占めている⁽²⁾。回生ブレーキを活用することで、回生電力の有効活用による省エネルギー効果・機械ブレーキの使用を抑えることによる部品摩耗の低減・電車操作性の向上による乗り心地の改善などを図っている。

しかしながら、架線電圧が極めて高い場合や付近に回生電力を消費する電車がいない場合では、回生失効や回生絞込みが発生し、回生ブレーキを有効に利用することができない。これに対し、近年では、図1に示すように、回生電力を吸収する機能を持つ変電所の設置、車上や地上に、二次電池、二重層キャパシタ、フライホイールなどの電力貯蔵装置の導入が検討されている。一方、新たな設備を設置しなくても、運転方法を工夫し、大きな回生電力を出すことを防げれば、回生機能を有効に利用することが可能となる。

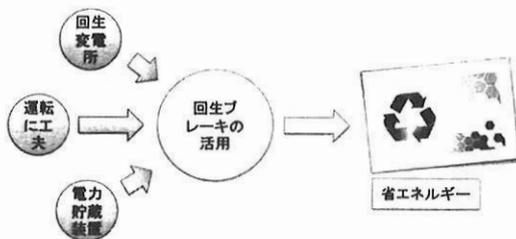


Fig. 1 Application of regenerative brake

電車の運転方法として、筆者らは省エネルギーに適す最大制動パワー制限ブレーキパターンを提案した⁽³⁾。その後の研究グループの中での議論と検討を通じ、運転への適用に必要な具体的な支援とデータ作成の考え方を導入した。本稿では、運転の安全と駅間走行時分の正確さを保ち、リアルタイム情報に基づき速やかに具体的操作方法を決め、且つ運転士に提示する運転支援方法を紹介する。

2. 回生ブレーキの活用

2.1 パワー制限ブレーキ

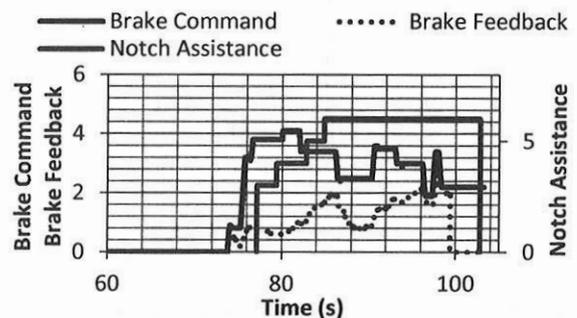


Fig. 2 Braking force recorded in experiment in March 2012

回生ブレーキとは、電車の制動の時に電動機を発電機として使い、電車の運動エネルギーを電力に変換して饋電線に返却するブレーキである。ただし、図2のように、

回生車が返却しようとする電力が大きく近傍に十分な負荷の無い場合、饋電線の電圧が高くなり、車両の主回路制御装置が電力変換装置を保護するため、回生ブレーキの絞込みを行い、エネルギー回収効率が低くなってしまふ。高速走行時に大きな回生電力の発生を回避すれば、回生失効や回生絞込みを抑え、回生ブレーキを有効活用することが出来る。

このような考えに基づき提案する「パワー制限ブレーキパターン」⁽³⁾を図3に示す。実線は従来しばしば用いられてきた「最大ブレーキパターン」で、速度に関わらず最大ブレーキ力を出すことができる。このパターンを応用すると、電車を短時間短距離で止めることができ、操作も簡単なため、広く使われてきた。破線は「パワー制限ブレーキパターン」で、低速域で最大ブレーキ力を出す一方で、電動機/発電機性能に合わせ高速域で速度の二乗に反比例し低下する。すなわちこれにより、電動機の弱め界磁領域（高速域）での機械ブレーキ使用を抑制できる。点線は「離散化パワー制限ブレーキパターン」で、最大ブレーキ力をN等分し、パワー制限パターンの内側に合わせた階段状のブレーキパターンとなっている。ある速度範囲で一定な制動力指令を出すため、適切な支援があれば、運転士が実行できるブレーキパターンと考えられる。この（離散化）パワー制限ブレーキパターンにおいて v_0 は制動力を低下させ始める速度で、図4に示すように、 v_0 を小さくすれば「制限」が強くなり、パワー最大値 $P_{max} = F_{max} \times v_0$ が小さくなる。その逆、 v_0 を大きくすれば「制限」が弱くなり、最大パワーが大きくなる。従って、 v_0 を小さくし、弱いブレーキをかければ、大きな電力を出すことを避け、回生失効や回生絞込みを低減することができる。このようにしても周囲状況が悪く電圧が上昇する時に回生絞込みを完全に回避することはできないが、周辺の電車との細かい情報交換ができない一般的な条件において、回生制動の最大活用を可能とする方法である。

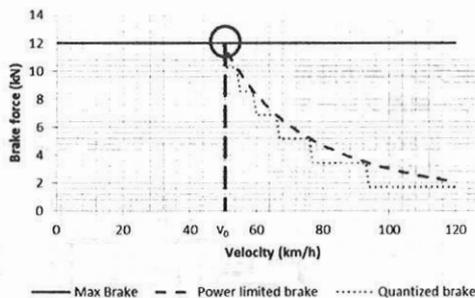


Fig. 3 Power limited brake

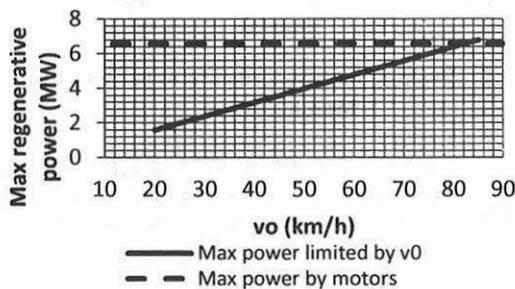


Fig. 4 Regenerative power output

電車の運転においては、安全性と定時性が最優先である。先述の省エネルギーを実現するため v_0 を小さくし弱いブレーキをかけると、制動距離と制動時間が伸び、オーバーランもしくは到着遅れの恐れが出る。従って、以下では、安全性と定時性を守りながらどのように省エネルギー効果を最大限引き出すかを考える。

2.2 緩いブレーキの制約

図5のような一般的な基準運転曲線を考える。電車がA駅から発車し、13.70kmのところで目標速度を達成し惰行に入る。13.80kmから制動し、B駅に停止する。

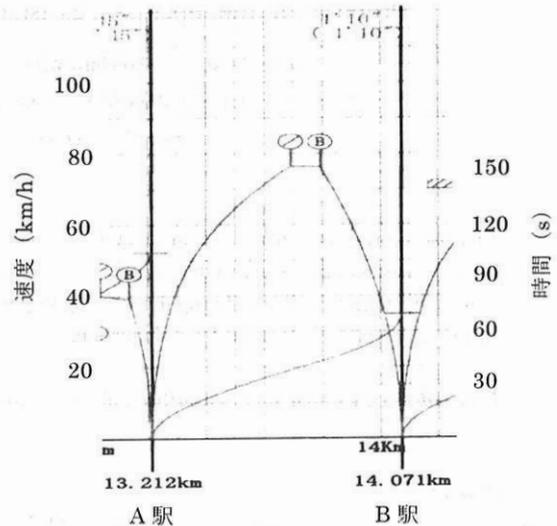


Fig. 5 Run curve

本例の区間の基準運転時分は1分10秒であるが、これは電車の最低性能で走ると想定した運転時分である。饋電線電圧が極めて低い場合を除けば、電車はより早く走ることができる。以前のある現車実験の結果によると、基準運転時分が100秒の区間での実際の運転時分は90秒だった。そのため、運転時分を守る前提で、基準運転曲線より早く走った余裕時間を、省エネルギー運転に利用することが考えられる。

従来、電車が次駅にオーバーランしないために、惰行距離を縮め、早めに比較的強いブレーキに入るのが一般的であった。これに対し図3、図4で提唱したパワー制限ブレーキでは高速で早めに緩いブレーキ動作に入り、その後徐々にブレーキ力を増してゆく。制動にかかる時間が増えるが、走行の前半に時間余裕があれば全体の走行時分を守ることができる。

以上のように、基準運転より余った時間余裕を生かす緩いブレーキは、安全性、定時性、省エネルギー効果の間にバランスを取る、エコ的な電車運転手段である。

3. 運転支援提案

2.1に論じたパワー制限ブレーキは電車速度により制動力が違い従来より操作が難しいため、運転士に対する支援が重要である。また、有人運転の支援に基づき、将来ATOが搭載した車両に直接に電車をコントロールすることも可能である。以下は、支援運転を構成する三つの部分、電車の運転情報の収集、支援意思の決定、ブレ

キの操作支援を紹介する。

3.1 運転情報の収集

運転情報の収集とは、電車の速度、位置、走行時間、き線電流電圧などの情報を収集することである。これらの情報に基づき、採用すべきブレーキパターンを決定することを、ブレーキパターンの修正や、及び省エネルギー効果を可視化するために利用する。本研究における現車試験では、GPSによる電車速度、位置のデータ収集をはじめ、車上搭載の記録装置からデータをリアルタイムに読み取った。速度、位置情報以外にも、ブレーキ指令、電気ブレーキ出力、き線電圧、き線電流、応荷重など、電車の走行状態を反映する様々な情報を収集することで、異なる状況での運転支援効果を全面的に分析することが可能となる。

支援システム的意思決定に有効な情報とは、電車の将来の運転状態を比較的正確に推測し、かつブレーキ動作に入る前に収集できる情報である。したがって、ブレーキ動作以前の力行、或いは惰行の二つ運転状態の中では、架線電圧の影響を受けない惰行時に意思決定を行うほうが好ましい。

3.2 支援意思の決定

本稿の支援意思の決定とは、既に収集した電車の走行情報に基づき、基準運転時分以内で駅に到着し、かつオーバーランなしに停止するとの前提で、最も緩いブレーキパターンを決定することである。

リアルタイム意思決定なので、できるだけ計算時間と計算量が少ないアルゴリズムが要求される。筆者の提案は、リアルタイムにシミュレーションではなく、オフラインであらゆる可能な状況に対し対応すべきブレーキパターンを用意し、容易に検索できる「辞書」として、支援開始点における通過速度と残り時間を index とするテーブルを用意することで、運転支援を行う時に電車の走行状態をこの辞書から選択し、適切なブレーキパターンを速やかに見つけること。

理論的には、惰行状態におけるあらゆる位置、あらゆる速度、あらゆる残り時間をカバーする辞書を用意し、各ケースにおける最も緩いブレーキの制動パターンを収録すればよい。ただし、ここに注意を払うべきなのは、データベースのサイズである。リアルタイム支援にはデータの通信速度を確保する必要があるため、あまり大きなデータベースでは検索時間も通信時間も長くなり、リアルタイム支援ができない恐れがある。従って、電車の走行状態を全面的にカバーしつつ、適切に小さな辞書を準備することが鍵となる。

そこで支援開始位置を固定する。すなわち支援開始位置を複数の既定値にし、電車はその位置を通過する時の速度と残り時間から、最も緩いブレーキパターンを選択する。この方法の優位点は、事前に容易に予測できる電車の惰行区間に支援開始位置を設ければ、電車がその点を惰行で通過することがほぼ確実になることである。また、過去の現車実験でわかった多様な運転状況に柔軟に対応するため、支援開始位置を複数設ける。電車の加速性能が優れ予定より早く加速終了した場合に、早い段階で支援運転に入ることができ、より多くの残り時間を活かして緩いブレーキパターンを選択する。一方、電車が何らかの原因で速度を低下させ余裕時間が少なくなった場合、次の支援開始点で新たな情報に基づく支援ブレー

キパターンを更新すれば、到着時分を守ることができる。

各 v_0 に適するブレーキパターンを作るには、決められたブレーキ出力に従って、次駅から制動曲線を逆引きし、支援開始点での通過速度まで支援運転曲線を作成してもよいが、異なる通過速度に該当する支援指令の違いは制動開始点の位置だけなので、それらの支援指令をすべてに収録することは冗長となる。そこで、支援開始点の各通過速度に合わせて支援指令を用意するのではなく、図6のように、支援開始点での想定した最大速度まで制動曲線(破線)と支援指令(実線)を用意し、実際の電車運転曲線(点線)を監視しながら、支援曲線(破線)とぶつかる点(A点)から支援指令(実線)をアクティブにすれば、同じ v_0 に該当するすべての通過速度を一つの制動支援軌道データで対応できる。

これにより、辞書とデータベースのサイズを抑えながら必要な支援情報をカバーし、リアルタイムの支援意思決定が可能となる。

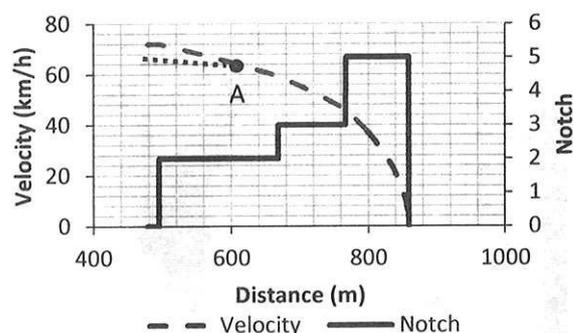


Fig. 6 Application of brake pattern

3.3 ブレーキの操作支援

本稿におけるブレーキの操作支援とは、決定したブレーキパターンを運転士に伝達することである。運転士に指令に円滑に従ってもらうためには、指令の種類ができるだけ単一で、操作が簡単で、かつ連続する二つの指令の間に時間の余裕を十分に考慮することが重要である。そこで、運転台に10インチの汎用携帯端末の液晶モニターを設置し、その画面にノッチ指令を数字と扇形の図で同時に出すとともに、スピーカを設置し、雑音があっても聞き取りやすい女性の音声でノッチ指令を読み上げることにした。ノッチ指令は運転士の習慣を考慮し、通常のノッチ操作範囲内の三つに絞った。さらに、保安のために、支援指令の最大ブレーキ力を実際の最大ブレーキ力の5/7程度にし、支援指令で止まらない場合のより強い制動を可能とした。

4. ケーススタディとシミュレーション

ケーススタディとして、図5の区間の基準運転曲線の力行終了点を支援開始位置とし、電車がそこを通過する時の速度と残り時間に基づき、最も弱いブレーキを提示する v_0 を計算する。その結果が図7に示す。図7は、電車が支援開始位置を通過する速度をx軸、残り時間をy軸に、二次元のテーブルを用意し、その上に各(x, y)に適用する一番小さな v_0 をz軸プロットした「辞書」である。x軸(速度)の幅は、基準運転曲線の速度 ± 10 km/hの範囲に設定し、電車が支援開始位置での通過速度の可能な範囲とする。「A band」と表示された部分は、ある通過速

度に異なる残り時間が与えられた場合に、採用可能な一番小さな v_0 であり、上の辺では残り時間が少なく大きい v_0 を、下の辺では残り時間に余裕があり小さい v_0 を採用する。もしも残り時間が上の辺より少なければ、ぎりぎりまで惰行し最大ブレーキをかけたとしても駅間走行時分を守ることができず遅延を生じてしまう。一方、残り時間が下の辺より多かったとしても、保安上の理由から v_0 を下げたより緩いブレーキ操作は行わない。

上記の二次元のテーブルにあるすべての v_0 に対して、電車が支援開始位置から停車駅まで、 v_0 に一意に対応した出力のパターンに基づき、図8のように次駅から逆引き計算をし、ブレーキ開始位置と各ブレーキノッチの入れる位置とを求め、支援操作パターンを用意する。電車の速度が支援速度より低い時にはまず惰行指令を出しておき、図6のA点で示した通り電車速度が支援速度と一致した時に支援指令をアクティブにする。

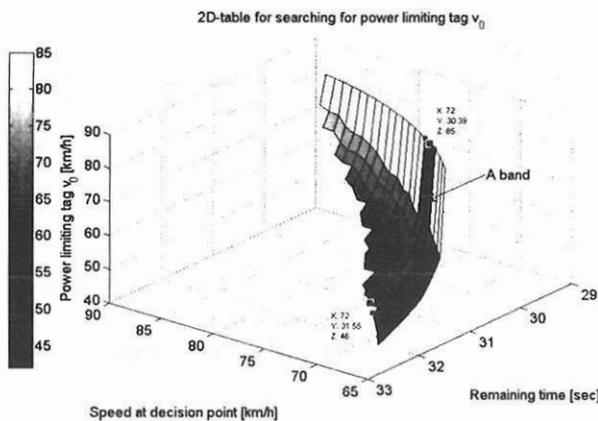


Fig. 7 2D-table for searching for power limiting tag

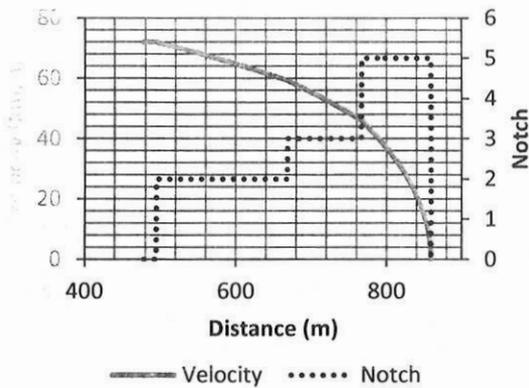


Fig. 8 Braking command and velocity

以上のように v_0 を探す二次元の「辞書」と該当のブレーキパターンを含めた v_0 による一次元データベースを独立に用意すれば、実際電車が支援開始位置を通過する時の状態に基づき、リアルタイムに適切なブレーキ指令を出すことが可能となる。動作確認のため、このデータベースを交通安全環境研究所が開発した運転支援システムに実装し、現車試験で記録された走行データを用いてその動作を模擬検証した。その一部の結果を図9に示す。

図9に、12150mから発車した電車(青線、B)が、基

準運転曲線(赤線、A)より高い加速度で力行し、支援開始位置(黄緑点)の前に惰行に入る。支援開始位置を通過する速度72km/hは基準速度76km/hよりやや低い、その差が図7の辞書にカバーされるので支障が生じない。基準運転曲線より速く走って稼いだ時間から $v_0 = 46\text{km/h}$ が適切なパワー制限速度だと辞書から判断し、支援システムが $v_0 = 46\text{km/h}$ に該当する支援運転曲線(緑線、C)を提示する。その運転支援曲線をもとに、電車の位置に基づき運転士に適切な指令が送られ、既定の緩いブレーキパターンのもとに運転士のノッチ操作を支援する。また、図4によると $v_0 = 46\text{km/h}$ の時の最大回生電力は約3.7MWで、電動機の最大パワー6.57MWを大きく下回るので、C線に従って運転すれば回生失効や回生絞込みを有効に抑えることが可能となる。

この実走行データを用いたシミュレーションを通じ、本稿で提案している辞書・ブレーキパターンというデータベースを利用し、余裕時間を生かしリアルタイムで適切な緩いブレーキパターンを提示することが可能ことが確認された。実際の支援における、多様な線路状況、運転士の操作、電圧の変動、回生電力量の変化に関する考察を、2012年10月の現車実験で行う。

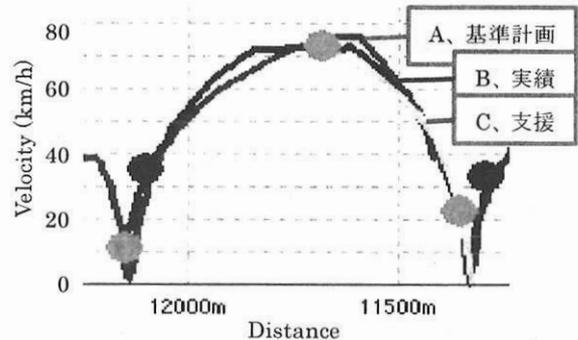


Fig. 9 Simulation with recorded run curve

5. まとめ

以上が、電車の省エネルギー運転のためのブレーキ出力制御とリアルタイムの運転支援方法を提案した。これを通じ回生失効や回生絞込みを低減し、回生ブレーキをより活用することができる。

今後は、本提案に基づき、支援データを現車システムに実装し、実際の路線で実験を行うことにより、提案手法の性能と効果の検証を進めていく予定である。

なお、本研究は鉄道建設・運輸設備整備支援機構の「運転分野における基礎的な研究推進制度」採択研究課題として実施されたものである。同機構、交通安全環境研究所、新京成電鉄、セントラルエンジニアリングの関係者各位、および有益なご指導をいただいた千葉大学近藤圭一郎先生に謝意を表す。

参考文献

- 1) 電気車研究会「鉄道ピクトリアル」1999年2月号、No. 665, P. 48-53
- 2) 日本民営鉄道協会、環境パンフレット「環境と鉄道」、2008. 10
- 3) 古関隆章：直流電気鉄道回生エネルギー有効活用のための運転支援と高度なブレーキ力制御、電気学会研究会資料、pp59-64、2012. 07