

地上回生機能を活用した直流電車の高速回生 ブレーキ導入効果の評価

野田 昂志*, 古関 隆章 (東京大学)

Evaluation of Full Usage of Regenerative Brakes of an Electric Train in High Speed at DC-electrification with Regenerative Substations
Takashi Noda, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

1. まえがき

近年の電気鉄道車両はブレーキ時に主電動機を用いて発電し、回収したエネルギーを同じ路線上の他の列車等に供給する電気ブレーキ、すなわち回生ブレーキを用いている。このような車両であっても、従来の摩擦による機械ブレーキと電磁気力による回生ブレーキが併用されている。これは回生ブレーキだけでは常用最大ブレーキ力を下回ってしまうからである。

電気車の機械ブレーキは空気圧で制御されているため応答速度が遅い。ブレーキ力は摩擦力であるから、摩擦係数という非常に環境に左右されやすい要素を含んでいる。さらに機械ブレーキは保守に手間と費用がかかる上、摩擦の変動要素が原因で乗り心地を悪化させたり滑走を誘発したりする問題もある。

本稿では、地上回生機能を活用した直流電気鉄道⁽¹⁾の高速車両で機械ブレーキを用いない純電気ブレーキ⁽²⁾の導入効果の評価を目的とする。

2. 回生ブレーキの現状

図1に一般的な誘導電動機駆動車の減速特性を示す。この特性は低速側から定トルク領域、トルクが速度に反比例する定電力領域、トルクが速度の2乗に反比例する特性領域に分けられ、定電力領域で電力は最大になる。図に示すように高速域では回生ブレーキ力が低下している。一般的にブレーキ力は速度に関係なく一定の減速度を得られるよ

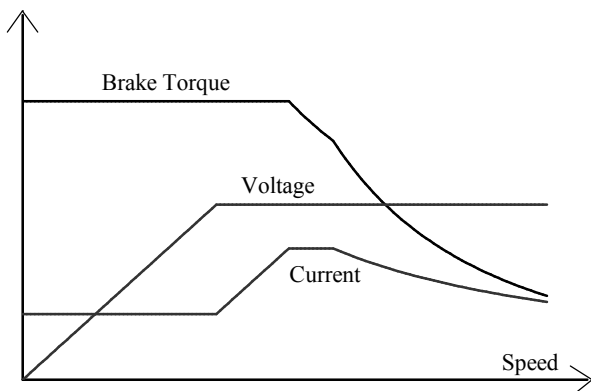


図1 誘導電動機駆動車の減速特性

Fig.1. Speed characteristics of a train driven by induction motor

うに設定する。そのため高速域では不足分を機械ブレーキによって補っている。また、回生エネルギーを消費する負荷が近くにないと架線電圧が上昇してしまうため、機器保護のために回路遮断をしたり、電圧上昇を抑えるために回生電流の絞り込みが行われたりする。都心部のような列車密度の高い路線において回生失効はほとんど起こらないが、列車密度がそれほど高くない路線では回生電流の絞り込みにより、性能設計通りの電気ブレーキ力が得られていない場合も多い。しかし地上回生機能があれば、回生失効や絞り込みがほとんど起こらずに回生ブレーキの性能を十分に発揮できる。また、電空併用ブレーキでの機械ブレーキ使用によるブレーキシューの磨耗が防止され、メンテナンスコストの削減にもつながる。そこで本稿では、地上回生機能を活用し車上の電動機-発電機のトルク特性の範囲でブレーキ力を発生させる運転方式を提案し、運転曲線やエネルギー収支に与える影響を評価する。

3. 高速回生ブレーキ導入効果

<3・1>条件設定 純電気ブレーキパターン⁽³⁾の数値的検討を行うために、以下のような条件設定をした。

- (1)路線長 37.4km, 駅数 15, 変電所数 9
- (2)地上回生設備により上位系統への回生が可能
- (3)変電所送り出し電圧は 1500V 一定
- (4)列車は 1 編成

また、ブレーキパターンは従来の電空併用ブレーキで一定減速度を得るパターンと、新たに提案する回生ブレーキのみの純電気ブレーキパターンの2通りで行った。純電気ブレーキパターンでは、走行時分を短縮するために惰行せずに加速または定速運転を行うオフブレーキ運転とした。

<3・2>計算上で考慮した点 計算は列車速度およびノッチを入力とし、列車質量や走行抵抗などから加速度、速度、距離を出力として得る。精度よくデジタル化した数値積分をするため、漸化式の導出には線形近似に基づく双一次変換を用いた離散化(Tustin変換)を行い、時間刻みは 0.1s とした。走行抵抗や勾配抵抗などは列車速度および位置の関数とし、パンタ点電圧の変動は列車位置の関数とした。また、力行および回生エネルギーは列車の持つ力学的エネルギーから変換効率を考慮することで導出した。

<3・3> 運転曲線に与える影響 図2に数値的検討での運転曲線の例を示す。電空併用ブレーキから純電気ブレーキに変更することで高速域のブレーキ力が十分に得られないことから、300mほど制動距離が延びている。これにより走行時分が延びることとなり、基準運転時分と比較した場合に路線区間全体で4.1s、1駅間あたりで0.3s延びる結果となった。鉄道において1駅間0.3sの増加は無視できないが、余裕時分まで考慮すれば十分に収まる範囲である。

<3・4> エネルギー収支に与える影響 図3にこの数値的検討での回生率、図4に全回生エネルギー、図5に全消費エネルギーを示す。ただし、回生率は式(1)のように回生エネルギーの総和を力行エネルギーの総和で割ったものとする。電空併用ブレーキから純電気ブレーキに変更することで、回生率が10%向上している。これは回生エネルギーが93.02kWh、割合にして35%増加したことによる。回生エネルギーが増加したことで全体の消費エネルギーが37.62kWh、割合にして11%減少している。機械ブレーキで捨てていた分を全て回生エネルギーとして回収することで消費エネルギーが低減されたのである。

$$\text{Regenerative factor} = \frac{\text{Total regenerative energy}}{\text{Total power running energy}} \quad (1)$$

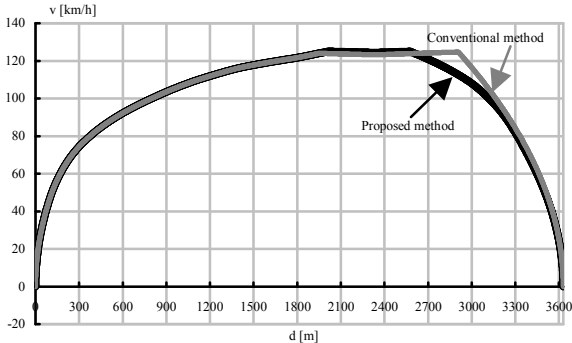


図2 運転曲線
Fig.2. Run curve

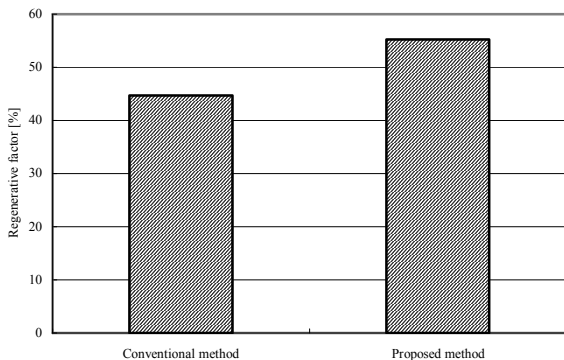


図3 回生率の比較
Fig.3. Comparison of regenerative factor

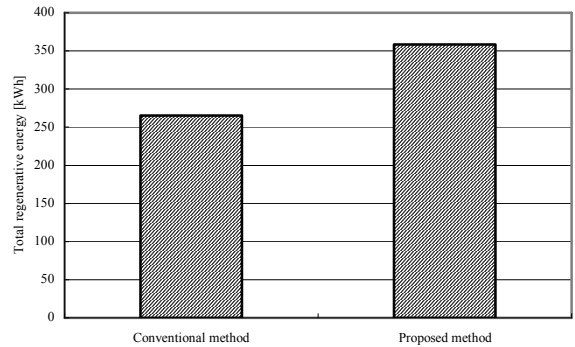


図4 全回生エネルギーの比較
Fig.4. Comparison of total regenerative energy

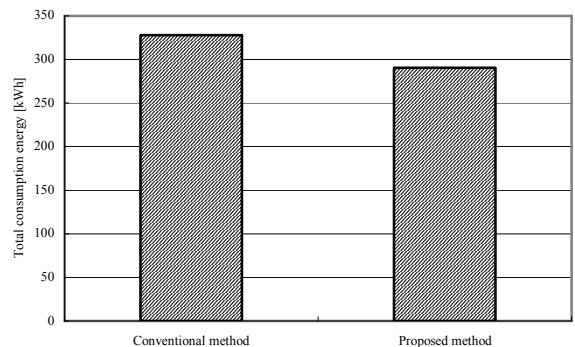


図5 全消費エネルギーの比較
Fig.5. Comparison of total consumption energy

4. 純電気ブレーキパターンの適用

純電気ブレーキは中・高速域で減速度が大きく低下する特性のため、運転士によるマニュアル運転では操作性などの点で実施が難しい。もし純電気ブレーキパターンに近いノッチ操作を運転士に要求するのであれば、何らかの支援情報を与える必要がある⁽³⁾。しかし、近年導入が進んできているTASCやATOを用いれば、ブレーキ力の設定など運転目標パターンを本提案のように設計することで容易に実現できる。

5. まとめ

本稿では、地上回生機能を活用した直流電気車において回生ブレーキのみをブレーキ力とする運転方式を提案し、その効果を評価した。その結果、今回の検討例では基準運転時分から1駅間あたり0.3sの運転時間の伸びが見込まれるものの、回生率を向上できることで11%の省エネルギーとなった。

文献

- (1) <http://www.mir.co.jp/>
- (2) 曾根：「電車のブレーキシステムの純電気ブレーキ化」平成8年電気学会全国大会, No.508, pp.5-350-5-351 (1996)
- (3) 田淵・鈴木・古関：「電気ブレーキ負担率向上のための制動標識利用の提案と検討」平成13年電気学会全国大会, No.5-253, pp.2092-2093 (2001)