

直流回生変電所下における高圧化と高速回生ブレーキ有効活用時の列車間電力融通の評価

野田 昂志*, 古関 隆章 (東京大学)

The Evaluation of Electric Power Interchange between Multiple Train Sets with High Speed Regenerative Brakes under High Voltage DC-regenerative Substations
Takashi Noda, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

1. まえがき

日本の電気鉄道車両の多くは、列車の運動エネルギーを回生制動により電力として回収し、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。そのため、現在の多くの電気鉄道車両では車両、き電システムともに回生ブレーキの持つ良さを必ずしも完全に活かすことができるものとはなっていない⁽¹⁾。

さらに、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。機械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多大なコストがかかる上、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の高速度車両で機械ブレーキを用いない純電気ブレーキ⁽²⁾を有効活用し、そのときの効果を明らかにする。

2. 回生ブレーキとその特徴

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、トルクが速度の二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。しかしながら、PWM 変電所などに挙げられるような地上回生機能を備えていれば、回生失効や回生絞り込みがほとんど起こらず回生ブレーキの性能を十分に発揮することができる。さらに、回生エネルギーの増加により省エネルギー化も図れる。また、機械ブレーキの使用率を抑えることができるため、ブレーキシューの磨耗が大幅に低減され、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一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、列車間の電力融通を考慮したモデルにおいてエネルギー収支に与える影響を評価する。

3. 高速回生ブレーキ有効活用の効果

<3・1>条件設定 純電気ブレーキパターンの数値的検討を行うために、表 1 のような条件設定をする。き電システムは回生変電所を備えているとし、余剰回生エネルギーは上位系統への回生が可能とする。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

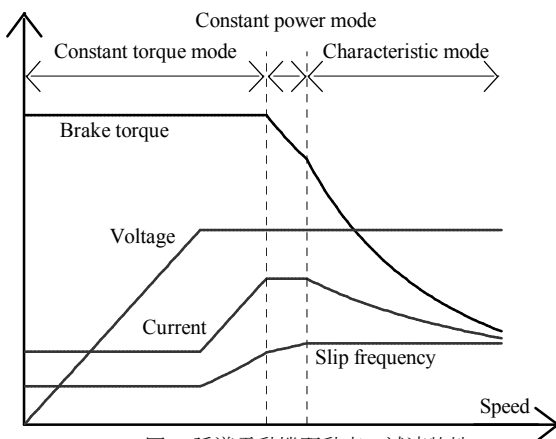


図 1 誘導電動機駆動車の減速特性

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

表 1 路線条件

Table 1. Conditions of the investigated line

The length of railway route	37.4 km
The number of stations	15
The number of substations	9
Sending voltage in substations	1600V
Feeding	DC-electrification

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での2ケースで行う。さらに、純電気ブレーキをより有効的に利用するため、変電所送出電圧を1600Vに昇圧したケースにて検討する。昇圧することで主電動機特性が向上し、高速域で減速度が大きく低下してしまう純電気ブレーキであっても、より高い減速度を確保でき、さらには省エネルギー化も図れる⁽³⁾。

<3・2>列車間電力融通の考慮 回生ブレーキは近くに回生エネルギーを消費する負荷、即ち力行する車両があつてこそ有効活用が図れる。回生エネルギーを他列車で利用することで省エネルギーとなるため、回生ブレーキの有効活用を評価するには、列車間電力融通の考慮が必須となる。

<3・3>エネルギー収支に与える影響 図2に今回の数値的検討で用いたモデル路線の周期ダイヤ、図3に総回生エネルギー、図4に総消費エネルギーを示す。列車間の電力融通を考慮していないモデルでは、一列車で走行した時のエネルギーを足し合わせている。つまり、回生ブレーキによるエネルギーはすべて上位系統へ回生してしまっていることを意味する。図3を見て分かるように、列車間の電力融通を考慮することで変電所ベースでの総回生エネルギーは大幅に小さくなる。これは回生エネルギーの一部を近くの力行車が利用しているからである。従来型の電空併用ブレーキでは24%、純電気ブレーキでは21%ほど変電所への回生エネルギーが減少した。これにより、回生ブレーキがどの程度有効利用され、エネルギーが節約できたかが分かる。

また、電空併用ブレーキから純電気ブレーキに変更した場合、列車間の電力融通を考慮したモデルでは23%ほど総回生エネルギーは増加し、結果として総消費エネルギーが11%ほど低減された。これは、機械ブレーキにより熱などとして捨てられていた分のエネルギーを回生エネルギーとして全て回収しているからである。

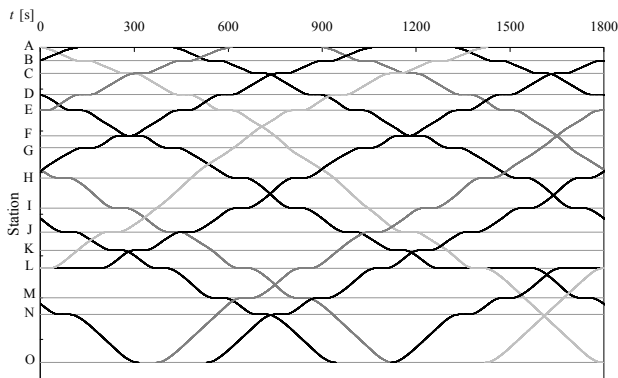


図2 モデル路線のダイヤ
Fig.2. Diagram for the case studies

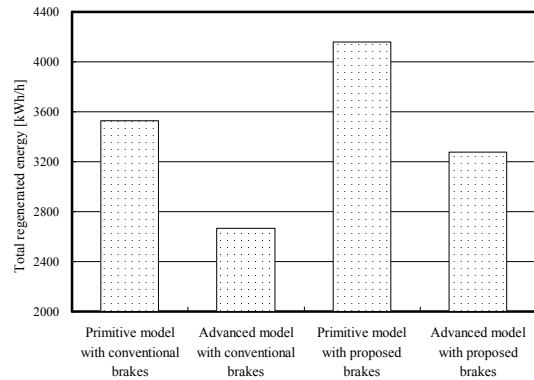


図3 総回生エネルギーの比較
Fig.3. Comparison of total regenerated energy

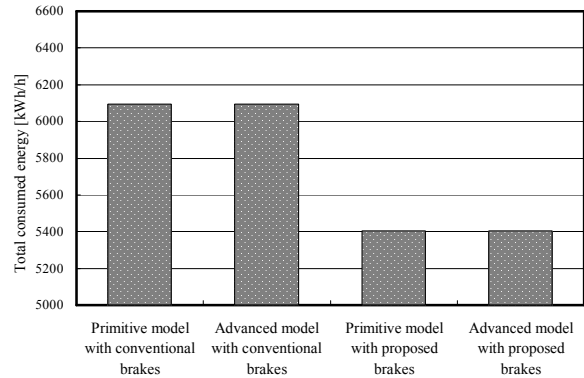


図4 総消費エネルギーの比較
Fig.4. Comparison of total consumed energy

4. まとめ

本稿では、直流回生変電所下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、列車間の電力融通を考慮したモデルによりその効果を評価した。その結果、回生ブレーキの有効活用が変電所ベースのエネルギー値として明らかになった。また、純電気ブレーキ化の効果により11%の省エネルギー効果も算出された。

今回拡張したモデルでは列車間電力融通の効果が定量的に評価できた。このモデルを用いればダイヤのタイミングを考慮した協調運転の評価も可能となり、より省エネルギー化を図った運転計画が検討できる。

文献

- (1) 渡邊朝紀：「電気ブレーキのさまざまな局面」鉄道車両と技術, No.49, pp.2-6 (1999)
- (2) 曾根悟：「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) T. Noda, T. Koseki：“Full Regenerative Braking in a Train at High Speed and Enhancement of Voltage, Powered by DC-electrification with Regenerative Substations” The International Conference on Electrical Engineering 2008, O-211 (2008)