

直流電気鉄道の省エネルギー運転における電力制限回生ブレーキの効果と回生率の影響評価

渡邊 翔一郎*, 古関 隆章 (東京大学)

Evaluation of Effects of Regeneration Ratio and Power-Limiting Brakes in Energy-Saving DC-Train Operations
Shoichiro Watanabe, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

1. 2つの省エネルギー運転方法と比較する動機

直流電気鉄道において省エネルギー運転を実現するにはノッチオフ速度を下げる, 回生ブレーキを精一杯使うなどといった方法がある。ノッチオフ速度を下げると力行に必要なエネルギーを減らすことができ, 回生ブレーキを精一杯使うと力行で使ったエネルギーの一部を回収することができる。しかし, ダイヤ通りに運行するためには走行時分を守らなければならない。そこで走行時分を守るという制約を考えると, 省エネルギー運転の方法は次の2つに絞られる。

- (I) ノッチオフ速度を下げ, 強いブレーキをかける
- (II) ノッチオフ速度を下げずに, 回生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機械ブレーキをかけて補い, (II)では機械ブレーキよりも緩い回生ブレーキを使って時間がかかった分を最初の力行で補っている。これらはいずれも有効な手段ではあるが, 一般に走行時分と消費電力量はトレードオフの関係にあるため, 両者を同時に実現することは不可能である。また, 直流電気鉄道においては, 変電所の整流器にダイオードが

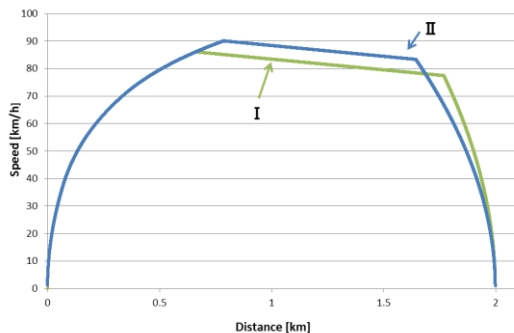


図1 走行時分を守って省エネルギー運転を実現した場合の運転曲線

Fig.1. Run curve for energy-saving operation in a standard running time

用いられているため, 回生ブレーキで得られた電力は同一区間の他の力行車で消費しなければならない。そこで, 回生電力が失効する場合, つまり電力制限回生ブレーキを考えて, (I)(II)の運転手法を様々な路線ケースでシミュレーションし, どちらが省エネルギー効果が大きいのかを考察した。

2. 運転曲線とエネルギーの計算方法

今回の検討では通勤電車をモデルに, 2kmの駅間を力行-惰行-制動で運行し, 再力行などは行わないものと仮定した。また, 走行時分と消費電力量の対応を見るために, ノッチオフ速度を変化させて測定した。そして, この駅間の路線では (i)勾配 (ii)ブレーキのかけ方 のそれぞれを変化させて組み合わせて, シミュレーションを行った。まず, (i)では0%と上り2%, 下り2%を準備し, 路線環境の変化による影響を調べた。(ii)では機械ブレーキで減速した場合, 回生ブレーキで減速した場合, そして電力制限回生ブレーキで減速した場合を準備した。ここで, 電力制限回生ブレーキでは回生電力の50%が失効した場合を想定している。機械ブレーキの強さは常用最大ブレーキの減速度3.5km/h/sに設定した。なお, 回生ブレーキもこの減速度を超えない範囲で制動している。

消費電力量 E_p [kWh]と回生電力量 E_r [kWh]の計算には式(1)~(3)を用いた。

$$E_p = \int F_m v \frac{1}{\eta} dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E_r = \int F_m v \eta dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

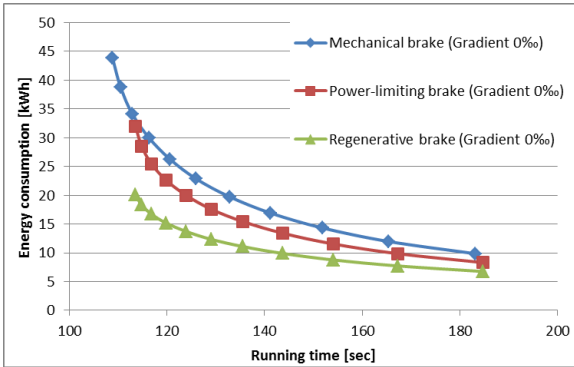
$$\eta = 0.90 \times 0.95 \times 0.975 \quad \dots\dots\dots (3)$$

F_m は引張力[N], v は速度[km/h], η はエネルギーの変換効率で「モータの効率×インバータの効率×駆動装置の効率」で定義する。

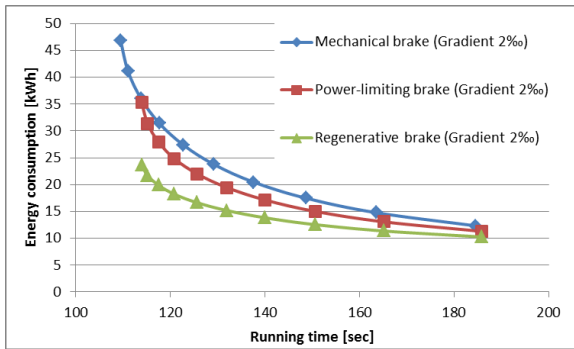
3. 計算結果と得られる知見

定員乗車でシミュレーションした結果を図2に示す。各図の凡例の「機械ブレーキ」が(I)の手法に対応し, 「電力制限回生ブレーキ」と「回生ブレーキ」が(II)の手法に対応

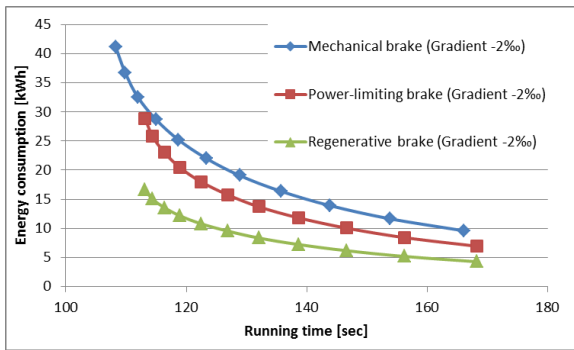
応



(a) 勾配 0‰
(a) Gradient of 0‰



(b) 上り勾配 2‰
(b) Gradient of 2‰ with uphill



(c) 下り勾配 2‰
(c) Gradient of 2‰ with downhill

図2 定員乗車時での消費電力量と走行時分の関係

Fig.2. Relation between running time and energy consumption in riding capacity of 100%

している。

図2のグラフを見ると、駅間を早く走ろうとするほど消費電力量が大きくなっている。そして、グラフの傾きに注目すると、最短時間に近づくほど1秒縮めるのに必要なエ

ネルギーが大きくなっている。

また、グラフの左端に注目すると、回生ブレーキを利用した運転手法では機械ブレーキを利用した運転手法より早く走ることができないことがわかる。

図2~4において同じ走行時分で見ると、どのケースでも機械ブレーキを用いるより回生ブレーキを用いた方が消費電力量が少なくなっている。したがって、これらのケースでは(I)の手法より(II)の手法の方が省エネルギー効果が大いことがわかる。これらの結果から、今後列車のATOを設計する際の思想として、回生ブレーキを精一杯活用する設計が良いと結論付けられる。

図2において電力制限ブレーキを見ると、走行時分が短くなるほど機械ブレーキのグラフに近づいていることがわかる。したがって回生失効の割合が増える列車の運転間隔が長い路線や、列車運行で遅延が発生した時など、走行時分を短くしたい場合では(I)の手法の方が優れるケースがあることも予想される。

走行時分が短いところでのグラフの傾きの絶対値を見ると、図2の(b), (a), (c)の順に大きくなっている。これは上り勾配が下り勾配に比べて力行時に扱う電力量が増え、ブレーキ時に扱う電力量が減っているためこのような結果になったものと考えられる。

一方で走行時分が長いところでの3つのグラフの間隔に注目すると、図2の(c), (a), (b)の順に開いている。これは前述の場合とは逆に、下り勾配が上り勾配に比べて力行時に扱う電力量が減り、回生ブレーキで扱う回生電力量が増えるためにこのような結果になったものと考えられる。

今後は電力制限回生ブレーキの回生失効率を変化させた場合や、勾配の大きい場合についてシミュレーションし、電力制限回生ブレーキの効果と回生率の影響をより深く評価していく予定である。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) Takafumi Koseki, Yuto Takahashi, and Zhe Yang, "Energy-Saving Operation of an Electric Train at Multiple Service Section Based on Sensitivity Analysis of Energy Consumption to Running Time", ICEMS2012, October 2012, Sapporo, Japan
- (2) Masafumi Miytake, "A method of Generating Energysaving Train Scheduling by Means of Mathematical Programming", Trans. IEE of Japan, vol.131-D, No.6, pp.860-861, 2010