

直流電気鉄道における回生エネルギー増加を図るための 運転支援および制御法

谷口 晴城* 近藤 圭一郎 (早稲田大学)
古関 隆章 (東京大学) 宮武 昌史 (上智大学)

Operation Support and Control Method
for Increasing Regenerative Energy in DC Electric Railway
Haruki Taniguchi*, Keiichiro Kondo (Waseda University)
Takafumi Koseki (The University of Tokyo), Masafumi Miyatake (Sophia University)

One of the ways to save energy in electric railway is to devise operating method. Recently, with the appearance of wide bandgap semiconductor devices, the current limit of inverters has been relaxed, and it has become possible to improve the regenerative brake performance of induction motor. In this study, we proposed an operation and control method for stopping train at a station with only regenerative brake use to improve energy-saving effect and verify the responsiveness of the control and the energy-saving effect.

キーワード：鉄道車両，回生ブレーキ，運転支援，速度制御
(Railway vehicles, Regenerative brake, Driver Advisory System, Speed Control)

1. はじめに

直流電気鉄道システムにおいて，車両の減速時に機械ブレーキと併用して回生ブレーキを利用することで，省エネルギー化や機械ブレーキのメンテナンスコスト削減が期待できる。回生ブレーキ力は，高速域で低減する特性を持つため，高速域では機械ブレーキによる損失が発生し，省エネルギー効果が低減してしまう。一方で，高速域でのブレーキ力を低減し，回生ブレーキのみで列車を停車させることで省エネルギー化を図るための研究が行われている。文献(1)では，現車試験において，運転士へノッチ操作指示の運転支援をすることにより，高速域からブレーキ力を徐々に強めていき，回生エネルギー増加を実現する手法を提案している。文献(2)では，回生ブレーキ力のみで鉄道車両を停車するために，“回生ブレーキノッチ”というブレーキ方法を導入する。その際，TICS (Train Information Control System：列車情報管理システム) で得られた車両の位置と速度の情報から作成した走行中の列車のランカーブと，回生ブレーキ力のみで停止した場合を想定して作成したランカーブを比較し，ブレーキ開始地点を運転支援で知らせることを想定する。これにより，回生エネルギー増加により省エネルギー効果向上を図っている。しかし，実際の車両に実装した際

に，応荷重制御ではカバーしきれない車両質量の変動や路線勾配などの外乱が生じる。

そこで，本研究では，文献(2)で提案された“回生ブレーキノッチ”を実走行で実現するためのブレーキ開始地点の判定法と運転支援法，回生ブレーキのみで減速するための速度制御法を検討する。これにより，通常回生ブレーキと機械ブレーキを併用する定減速度ブレーキに比べて，省エネルギー効果向上を図る。このとき，外乱などの影響により提案制御のみでは車両の停止位置がずれる可能性があるため，TASC (Train Automatic Stop-position Controller：定位置停止装置) の併用を前提とする。これにより，省エネ運転を実現する運転支援および制御の一手法を提案する。

2. 回生ブレーキノッチによる省エネ運転手法

〈2.1〉 回生ブレーキのみで停車する”回生ブレーキノッチ”の提案 一般に，回生ブレーキを備えた鉄道車両は電空協調ブレーキにより，回生ブレーキで足りない分の制動力を機械ブレーキが補うことで一定の制動力を得る。Fig.1 に，その際の回生ブレーキ力と機械ブレーキ力の負担割合を占めず。機械ブレーキを用いることで，一定の減速力が得られる一方で，機械ブレーキ損失が発生し，省エネルギー効果が低減する。

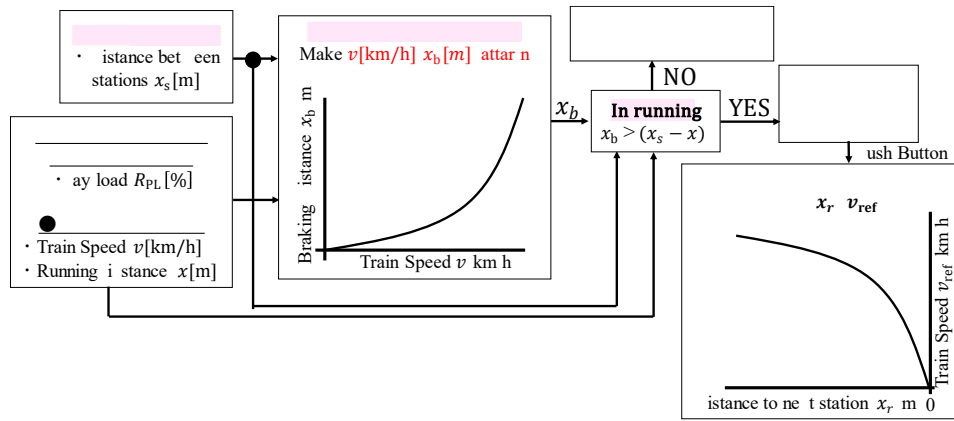


Fig.2. Algorithm for Regenerative Brake notch

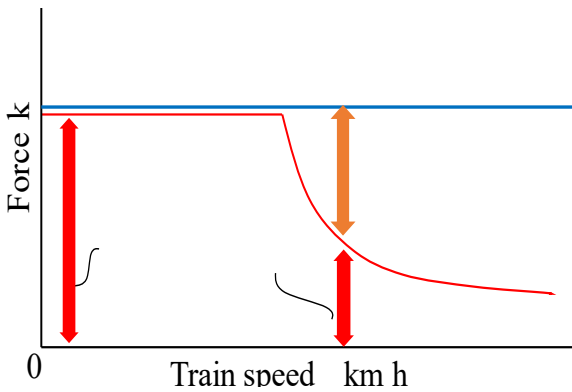


Fig.1. The Ratio of Regenerative Brake and Mechanical Brake in using cooperative brake

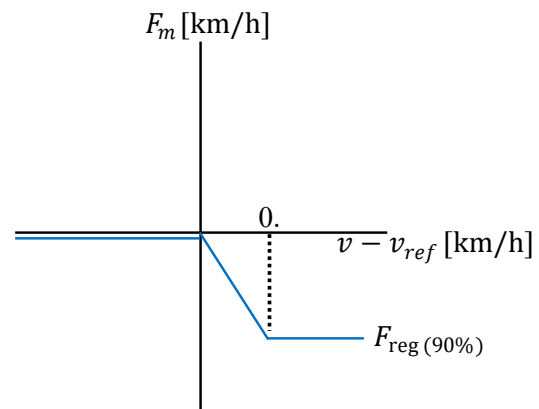


Fig.3. Speed Feedback Control System

本稿で提案する回生ブレーキノッチでは、走行距離、走行時分を守ることを制約に、この回生ブレーキ力曲線に沿ってブレーキをかける速度制御により、回生エネルギー増加や機械ブレーキによる損失の低減を図る。

Fig.2 を用いて本研究で用いる回生ブレーキノッチの仕組みを述べる。事前に駅間距離、回生ブレーキ力特性の情報を駅発車時に乗車率の情報を入手する。そして、得られた回生ブレーキ力特性および乗車率から、回生ブレーキ力のみで次の駅へ停車するための速度-制動距離曲線を作成する。そして、走行中に次駅までの距離の情報を入手し、速度-制動距離曲線から得られる停止距離よりと同じような距離の地点に到達した場合は、「回生ブレーキノッチランプ」を点灯させるなどして、運転士が「回生ブレーキノッチボタン」をオンにする。その後は、2.3 節で述べる速度制御により、回生ブレーキのみで停止位置まで停車する。これにより、機械ブレーキを用いず、回生ブレーキのみで停車するため、省エネルギー効果向上が期待できる。また回生ブレーキノッチの仕様はあくまでも運転士の任意性の委ねるものとする。

〈2.2〉 “回生ブレーキノッチ” 使用時のブレーキ開始地点判定法 回生ブレーキノッチ使用時の制動距離曲線の算出法とブレーキ開始地点の判定法を述べる。

まず、乗車率を反映させた速度-回生ブレーキ力特性のデータを用意し、車両の速度に対する全ブレーキ力 F_{ALL} [kN] の

特性を計算する。そして、走行抵抗 F_{res} [kN] を JRIS R 1060⁽³⁾ で定義される式(1)から求める。

$$R_t = (1.65 + 0.0247v_t)M_M + (0.78 + 0.0028v_t)M_T + \{0.028 + 0.0078(n - 1)\}v_t^2 \times g \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 v_t : 車両速度[km/h], M_M, M_T : M車, T車の荷重質量[t], n : 編成両数[-]である。

そして、式(2)より F_{ALL} [kN] から F_{res} 引いた値を車両全質量 M_{ALL} から速度に対する減速度 β [km/h/s] のデータを求められる。

$$\beta = \frac{(F_{ALL} - F_{res})}{M_{ALL}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

そして、減速度 β と 2 点間の速度 v_{low}, v_{high} から、制動距離の微小変化分 Δx を式(3)から求める。

最後に、式(3)で求められた Δx を積算することで、回生ブレーキのみを用いて停車するための、速度に対する制動距離の関係が得られる。このように列車走行に伴い逐次算出した制動距離 x_b が次駅までの距離 x_r より大きくなると、回生ブレーキノッチを動作させてもよいことを運転士に何らかの方法 (ランプ点灯など) で知らせる。そして、運転士が回生ブレーキノッチボタンを押すと回生ブレーキ力のみで制動を開始する、というような操作を想定する。

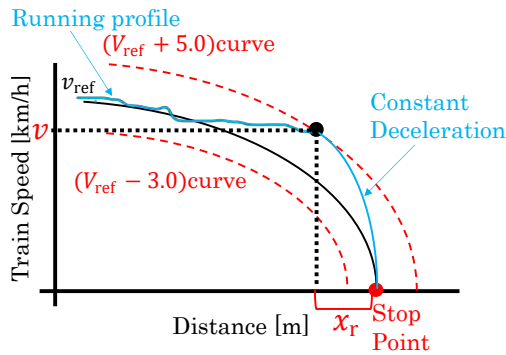


Fig.4. Control for Constant deceleration when Speed Control can't use

Table 1. Car Specification

M car weight t	29.8
T car weight t	27.0
MT ratio	3: 2
Train set vehicle number	10
The number of motors	24
Gear ratio	7.07
Wheel diameter m	0.86
acceleration km/h/s	3.0

Table 2. Specification of Induction motor

primary side Leakage Inductance l_1 mH	1.18
Secondary side Leakage Inductance l_2' mH	1.44
primary side Inductance L_1 mH	25.5
Secondary side Inductance L_2' mH	24.4
Stator Resistance R_1 Ω	0.094
Rotor Resistance R_2 Ω	0.112
Mutual Inductance M mH	2.43
poles	2
V/F Termination Speed km/h	1.4
Constant Torque Region Termination speed km/h (Regeneration)	60.1
Constant Power Region Termination speed km/h (Regeneration)	120.0
Regenerative Brake Torque Nm	863.

$$\Delta x = \frac{v_{low}^2 - v_{high}^2}{2\beta} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、本検討では、後述する速度制御で、回生ブレーキ力を調整するため、余裕を見て最大の回生ブレーキ力特性の9割の大きさの値を用いて、制動距離を算出する。

〈2.3〉 回生ブレーキノッチ実現のための速度制御法

回生ブレーキノッチボタンが押されると、列車は速度制御により Fig.2 の $x_r - V_{ref}$ 曲線に沿って減速していく。まず、Fig.2 の $x_r - V_{ref}$ 曲線に追従するように回生ブレーキ力指令値をフィードフォワード制御で与える。その際、外乱などが生じることを想定し、Fig.3 に示す速度フィードバック制御系を用いて、列車速度 v と速度指令値 V_{ref} の誤差に応じて回生ブレーキ力を調整する。これにより、ブレーキ開始地点か

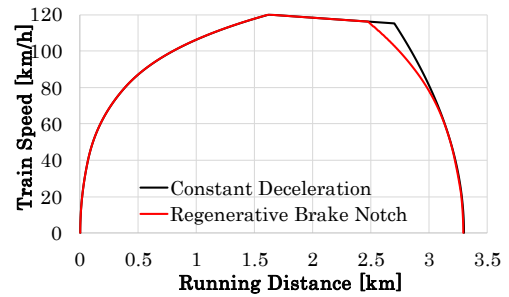


Fig. Running profile

Table 3. Energy in running

Brake Pattern	Constant Deceleration	Regenerative Brake Notch
Running Time [s]	144.3	145.0
The error of Running distance [cm]	+11.3	+7.7
Regenerative Energy[kWh]	36.9	45.1
Motor Loss Energy[kWh]	5.36	5.71
Running Loss Energy[kWh]	10.4	10.2
Mechanical Brake Loss Energy[kWh]	8.81	0.00

ら回生ブレーキのみを用いて、停止位置まで減速することができる。

〈2.4〉 外乱要素への対応策

実際に列車を走行する場合は、勾配や曲線を始めとした外乱要素により、十分な減速度が得られず、速度制御が困難となる可能性がある。本検討では、Fig.4 のように、速度指令値 V_{ref} との誤差がある基準を超えたときに、通常のブレーキノッチ操作を促す「定減速度ブレーキランプ」を点灯させ、式(4)より停止位置に停止するために必要な減速度が得られるブレーキノッチ操作を運転士に促すことを想定する。これにより、回生ブレーキと機械ブレーキを併用した定減速度ブレーキに切り替えることを想定する。すなわち、回生ブレーキノッチはその動作も解除も文献(2)と同様に、乗務員の判断で操作し、制動距離の確保などは運転士の責任で行う、通常の運転操作を前提としている。

$$\beta = \frac{-v^2}{2x_r} \dots\dots\dots (4)$$

3. 提案手法適用による省エネルギー効果の検証

〈3.1〉 想定する車両・路線条件

Table 1 に本シミュレーションで想定する車両の条件を示す。本検討では、都市部を走行する直流 1500[V]の一般的な通勤車を想定している。また、Table 2 に本検討で用いる鉄道車両駆動用誘導電動機の諸元や速度-ブレーキ力特性を示す。本検討では、駅間距離が 3.3[km]で、回生失効は生じず、全ての回生電力が近傍の力行車で消費される状況を仮定して計算している。

〈3.2〉 回生ブレーキノッチによる省エネルギー効果

〈3.2.1〉 平坦区間での定減速度ブレーキと回生ブレーキノッチの比較 Fig. に定減速度ブレーキと回生ブレーキノッチを用いた場合のそれぞれのランカーブを示す。ま

Table 4. Result of running it h parameter fluctuation

Ratio of Vehicle Mass[-]	1.10	1.05	1.00	0.95	0.90
Brake Initial Speed [km/h]	116.4	116.3	116.1	116.0	115.8
Difference of Running Time [s]	+0.61	+0.65	+0.70	+0.75	+0.80
The error of Running distance [cm]	+7.7	+7.8	+7.7	+7.6	+7.5
Normalized Regenerative Energy [kWh]	44.9	45.0	45.1	45.1	45.2
Motor Loss Energy [kWh]	6.65	6.17	5.71	5.28	4.88
Running Resistance Loss Energy [kWh]	10.4	10.3	10.2	10.1	10.0
Mechanical Brake Loss Energy [kWh]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table . Result of running it h slope

The angle of slope [%]	+10	+5	0	-5	-10
Brake Initial Speed [km/h]	116.1	116.1	116.1	116.1	116.1
Difference of Running Time [s]	+0.56	+0.55	+0.70	+0.80	+0.85
The error of Running distance [cm]	+20.5	-14.3	+7.7	-7.0	+7.3
Regenerative Energy [kWh]	41.4	43.2	45.1	46.9	48.5
Motor Loss Energy [kWh]	5.41	5.56	5.71	5.89	6.06
Running Resistance Loss Energy [kWh]	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
Slope Resistance Loss Energy [kWh]	4.6	2.3	0.0	-2.3	-4.6
Mechanical Brake Loss Energy [kWh]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19

た、Table 3 にそれぞれの走行における走行時間、走行距離のずれ、回生エネルギー、各種損失量を示す。回生ブレーキノッチを用いた場合、停止位置は駅間距離の 3.3 km から 7.7 cm のずれであり、走行時間は定減速度ブレーキを使用した場合に比べて 0.7 秒長くなった。また、回生ブレーキノッチにより、回生エネルギーが 8.2 kWh 増加し、機械ブレーキ損失量が 8.81 kWh 低減していることが分かる。

3.2.2 パラメータ変動が生じた場合の回生ブレーキノッチ性能と省エネルギー効果

本節では、応荷重制御の誤差や走行抵抗の誤差を想定し、 $x_r - V_{ref}$ 曲線は変えずに車両全体の質量が元の重量から % ずつ、最大 10% まで変動させたパターンを想定する。このとき、Fig.2 の提案制御により、走行時分、停止位置を守りつつ停車した上で、省エネルギー効果向上ができるかを検証する。

Table 4 にそれぞれの場合のブレーキ初速度、定減速度ブレーキを用いた場合との走行時間の差、停止位置に対する誤差、質量で正規化した回生エネルギー量、各損失量を示す。本検討では、回生エネルギーを車両重量で正規化して評価している。Table 4 より、車両の全重量の 10% 程度分の外乱に相当するパラメータ変動が生じて、走行時分や停止位置を守りつつ、定減速度ブレーキを使うよりも回生エネルギーが増加していることが分かる。また、正規化回生エネルギーがどのパターンでもほぼ等しいことから、回生エネルギー量はブレーキ開始時に車両が持っている運動エネルギーの量に大きく依存し、走行抵抗などによる影響は小さいと考えられる。

3.2.3 勾配がある場合の回生ブレーキノッチ性能と省エネルギー効果 本節では、制動区間に勾配がある場合を想定し、それぞれの場合に提案制御法で定位置に定時で停止しつつ、回生エネルギー増加が図れるかを検証する。本検討では、駅間距離 3.3[km] に対して、後半 0.6[km] の制動区間において、+10%、+5%、勾配なし、-5%、-10% の 5 パターンの一定勾配を想定する。

Table にそれぞれの場合のブレーキ初速度、定減速度ブレーキを用いた場合との走行時間の差、停止位置に対する

誤差、回生エネルギー量、各損失量を示す。この結果から、どの勾配パターンであっても、定位置に走行時分を守りつつ停車できていることが分かる。

ここで、勾配が -10% の場合に 0.19[kWh] の機械ブレーキ損失量が生じているのは、急な下り勾配の場合、減速するためにより大きな回生ブレーキ力が必要になるため、速度制御が困難となり、2.4 節で述べた定減速度ブレーキが 73.7 km Wh のタイミングから動作するためである。これにより機械ブレーキ損失が発生するが、減速により定トルク領域に近づくことで回生ブレーキ力が増加し、67.1[km/h] より低速域では機械ブレーキは使用しないため、機械ブレーキ損失量は、回生エネルギー 48.5[kWh] の大きさに対して微小となっている。

また、本検討において、上り勾配の場合は回生エネルギーが最小で 41.4[kWh] と小さくなるのは、上り勾配の場合は勾配抵抗により速度制御に必要な回生ブレーキ力が小さくなるためである。同様に、下り勾配の場合に回生エネルギーが最大 48.5[kWh] と大きくなるのは、減速に必要な回生ブレーキ力が大きくなるからである。

この結果から、勾配がある条件においても、回生ブレーキノッチにより、定減速度ブレーキよりも回生エネルギー増加が見込めることが分かる。

4. まとめ

本稿では、都市部を走行する直流電気鉄道を想定し、回生ブレーキ力のみで停車する回生ブレーキノッチを実現するためのブレーキ開始地点判定法と速度制御、それらを実現するための運転支援法の提案を行った。そして、走行時分、停止位置を守りつつを制約に走行シミュレーションで検証した結果、一般の定減速度ブレーキに比べ、回生ブレーキノッチを用いた場合、回生エネルギーを大幅に増加させることができることが確認された。

今後の課題として、実際の運転支援に適用するために、「回生ブレーキノッチランプが点灯してから運転士が反応してボタンを押すまでの時間」などを考慮して、ランプを点灯させる「先読み機能」を持たせることや、式(1)の走行抵抗の誤差などの外乱をまとめて対応する外乱オブザーバの適用が挙げられる。

文 献

- (1) 渡邊 翔一郎, 楊 哲, 古関 隆章, 近藤 圭一郎, 水間 毅, 濱崎 康宏, “現車試験による電力制限ブレーキの性能評価-電気鉄道の省エネルギー運転支援効果の実証-” 電気学会論文誌 D, Vol.134, No.8, p.767-775, 2014.8
- (2) F.P.WIJAYA, S.WATANABE, T.SAITO, H.KOBAYASHI, K.KONDO, “Advantages and technical issues of regenerative brake method at all over the speed range” Mechanical Engineering Journal, Vol.4, No.1, p. 16-00473, (11pages), 2017.4
- (3) 日本鉄道車輛工業会: JRIS R 1060 鉄道車両-電車の車両性能算出方法, p.6 (2016.12)