抵抗挿入による電力回生ブレーキの高速域電気ブレーキ力増大

正員 山下 道寛 正員 小笠 正道 正員 渡邊 朝紀

((財) 鉄道総合技術研究所)

Electric Brake Force Increase of Regenerative Brake in the High-Speed Range by Inserted Rheostats

Michihiro Yamashita, Member Masamichi Ogasa, Member Tomoki Watanabe, Member
(Railway Technical Research Institute)

Electric railway vehicles have come to use regenerative brake for normal operation from the top speed to almost zero speed. In the regenerative brake, the terminal voltage of traction motor cannot be increased due to the limited catenary voltage and blocking voltage of semiconductor devices. Therefore, the electrical brake force in the high-speed is smaller than that for middle or low speed. The total brake force for high-speed range mainly depends on the mechanical brake.

By inserting resistors between the inverter and traction motor, the regenerative brake force can be increased in the high-speed range without increase of the rated power or current of inverter.

In light-density line sections, regenerative brake force is frequently inactivated under light-load condition. In this condition, rheostats consume part of regenerative power generated by traction motors when the electric vehicle is braking. Then, the peak regenerative power for the feeder line will be decreased and electrical brake is easily activated, which is another merit.

We studied the possibility to increase the regenerative brake force in the high-speed range by considering characteristic curves, RMS current, and regeneration rates.

キーワード：電気車，電気ブレーキ，発電抵抗器，回生ブレーキ，発電ブレーキ

1. はじめに

最近，誘導電動機を主電動機とする電気鉄道車両にベクトル制御が応用され始め，軽負荷時の負荷に見合った回生ブレーキ制御や空転・滑走制御等に優れた効果が現れている。

一方，現在の電気鉄道車両では，低速域において電気ブレーキが絞られ，不足分を機械ブレーキにて補うことで完全停止させている。これは，停止まで電気ブレーキを掛けることができないとされていたためである。そのため，電気ブレーキから機械ブレーキへの切り替え（電空切替）に伴うショックが乗り心地に影響を与えたり，駅構内での停止間隙においてキー音が生じる場合があった。しかし，原理的には電気ブレーキのみで車両を零速まで停止させることが可能はずである。そして，この件に関しては最近検討が進み，試験結果や実例が報告されている。^{(1),(2),(3),(4)}

鉄道車両用の主電動機は，一般に定トルク域（一定磁束域）の終端が最高速度の1/2～1/3と低く設計されている。通常，中高速域では弱め磁束制御，特性加速

を行うため，主電動機トルクは低下する。そのため，高速域における電気ブレーキ力はあまり期待できず，ブレーキ力の多くを機械ブレーキに頼っている場合が多い。誘導電動機の特長領域において，電気ブレーキ力を増大させる試みはまだない。パワーの大きい高速域において電気ブレーキ力を増大させることができれば，ブレーキシューやライニングの摩耗による交換や検査などのメンテナンスを低減させることが可能である。

直流電動機のチョップ制御では，高速域の電気ブレーキ力増大に関して，次のような抵抗挿入事例がある。旧国鉄の201系通勤電車（直流直巻電動機駆動）において，通常回生ブレーキ方式では高速域における電気ブレーキ力が期待できないため，速度75[km/h]以上では，発電抵抗を電機子チョップと直流電動機間に直列に挿入することで，ブレーキ力（主電動機トルク）を増大させている。図1に201系通勤電車の主回路の概略図を示す。実際には直流直巻電動機は4直列2並列（8台）接続されている。簡単のため図1では電動機1台のみで表している。ここで， L_f :フィルタリア

クトル, C:フィルタコンデンサ, Re:発電抵抗, MSL:主平滑リアクトル, G:歯車装置である。

本論文では、インバータ制御車に対し、機械ブレーキの負担が最も大きくなる高速域において、インバータと主電動機（誘導電動機）間に発電抵抗を挿入することを提案し、電気ブレーキ力を増大させることを検討した。

回生ブレーキ時の主電動機端子電圧の上限は、主に架線電圧によって制限されていて、高速域では一定電圧となる。そのため、弱め磁束領域や特性領域では、電気ブレーキ力が定トルク域に比べ小さい。そこで、発電抵抗を挿入することにより、抵抗の電圧降下分だけ主電動機の端子電圧を上昇させることで、インバータ交流出力端子電圧の値を変えずに、停動トルクを増大させることができる。その結果、インバータの容量を増加させることなく、高速域の電気ブレーキ力増大が可能となる。また、インバータ容量増大と主電動機定格速度向上によって電気ブレーキ力を増大させた場合に較べて、本方式では主電動機発電電力の一部が発電抵抗により消費されるため、高速域における架線への回生電力ピークが抑制され、軽負荷となりやすい線区に対して、回生失効抑制に効果があると考えられる。

なお、検討のモデルには、通常の近郊電車を用いている。

図1 チョップ駆動電車の主回路システムの概要
Fig. 1 Schematic diagram of chopper-driven traction circuit system.

2. 主電動機特性の算出

本論文で検討する主回路システムの概略を図2に示す。誘導電動機で駆動される電車に対し、インバータと主電動機間に、発電抵抗 R と発電抵抗短絡用のスイッチを挿入している。力行時にはスイッチが閉じて抵抗 R を短絡する。

高速域の回生時にはスイッチを開き、インバータと主電動機間に発電抵抗が挿入された状態となる。抵抗挿入により、発電抵抗が受け持つ電圧分だけ主電動機端子電

圧を従来の主電動機端子電圧より上昇させることが可能となる。その結果、高速域における主電動機の停動トルクが増大し、インバータの電流量を増加させることなく、高速域の電気ブレーキ力増大が可能となる。

現在のところ、スイッチには機械的な真空遮断器か半導体素子を組み合わせた電子スイッチを想定している。

通常動作では、力行中はスイッチが投入されていて、ブレーキ動作を始めるときにスイッチが開放され、抵抗が挿入された状態となる。そして、高速域から減速し、主電動機端子電圧が低下し発電抵抗が不要になった時点で、発電抵抗による回生電力の損失を抑えるため、スイッチを閉じ抵抗を短絡させる。

主電動機が通電されているときのスイッチ動作は、投入動作であるため、動作時の過電圧やアークといった問題は少ないと考える。

抵抗 R の値は 1, 2, 3 [Ω] の3通りの場合を検討した。

図2 インバータ駆動電車の主回路システムの概要
Fig. 2 Schematic diagram of inverter-driven traction circuit system. (rheostats insertion type)

電源電圧と同期して回転する d - q 座標上において、瞬時ベクトルで記述される誘導電動機の定常状態における電圧方程式は次式となる^{(5), (6)}。この時、二次鎖交磁束ベクトルは d 軸に一致しているものとする。簡単化のため、架線とインバータ間の LC フィルタの動特性については考慮していない。

$$V_{1d} = R i_{1d} - \omega \sigma L_1 i_{1q} \quad [\text{V}] \quad (1)$$

$$V_{1q} = R i_{1q} + \omega L_1 i_{1d} \quad [\text{V}] \quad (2)$$

$$\tau = P \frac{M^2}{L_2} i_{1d} i_{1q} \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (3)$$

$$\omega = \omega_{2n} + \omega_s \quad [\text{rad/s}] \quad (4)$$

$$\omega_s = \frac{R_2}{L_2} \cdot \frac{i_{1q}}{i_{1d}} \quad [\text{rad/s}] \quad (5)$$

ここで、

i_{1d} , i_{1q} :一次側の d - q 軸電流, i_{2d} , i_{2q} :二次側の d - q

軸電流 v_{1d}, v_{1q} :一次側の d - q 軸電圧, v_{2d}, v_{2q} :二次側の d - q 軸電圧, ϕ_{1d}, ϕ_{1q} :一次側の d - q 軸磁束, ϕ_{2d}, ϕ_{2q} :二次側の d - q 軸磁束, τ :トルク, ω :一次角周波数, ω_{2n} :回転子角周波数, ω_s :すべり角周波数, R_1 :一次抵抗, R_2 :二次抵抗, L_1 :一次インダクタンス, L_2 :二次インダクタンス, M :相互インダクタンス, $\sigma=1-M^2/L_1L_2$:もれ係数, P :極対数

主電動機トルク τ とブレーキ力 F の関係と、回転角速度 ω_{2n} と車両速度 V_t の関係を(6),(7)式に示す。

$$F = \frac{Gr}{r} \tau \quad [\text{N}] \quad (6)$$

$$V_t = \frac{3.6r\omega_{2n}}{PG_r} \quad [\text{km/h}] \quad (7)$$

ここで, r :車輪半径, G_r :歯車比 とする。

(1),(2)式のパラメータは、図3で表される誘導電動機の等価回路パラメータと等価である。ここで, R は発電抵抗値を表し、誘導電動機等価回路に含めて表現している。

図3 誘導電動機等価回路
Fig.3 Equivalent circuit of induction motor

表1 主電動機の定数
Table.1 Parameters of traction motor

一次抵抗	R_1 [Ω]	0.0942
二次抵抗	R_2 [Ω]	0.0886
一次インダクタンス	L_1 [H]	0.034
二次インダクタンス	L_2 [H]	0.034
相互インダクタンス	M [H]	0.033
極数	P	4
定格電圧	[V]	1100
定格電流	[A]	125
定格周波数	[Hz]	100

ここで, V_i :一次電圧フェーザ, I_1 :一次電流フェーザ, I_2 :二次電流フェーザである。

$$I_m = |I_1| = \sqrt{i_{1d}^2 + i_{1q}^2} / \sqrt{3} \quad [\text{A}] \quad (8)$$

$$V_m = |V_1| = \sqrt{v_{1d}^2 + v_{1q}^2} \quad [\text{V}] \quad (9)$$

I_m :主電動機電流実効値

V_m :主電動機線間電圧実効値

V_i :インバータ出力端子電圧実効値

(1),(2)式に R を加えて算出した v_{1d}, v_{1q} を用いて(9)式で V_i 式を算出。

F :各軸ブレーキ力(ブレーキ時は負の値とする)

表1に主電動機の定数を示す。

発電抵抗値に対する停動トルクの値は、次式⁽⁹⁾で表され、発電抵抗値 R に対する停動トルク τ_{bd} の特性が把握できる。

$$\begin{aligned} \tau_{bd} &= \frac{N_p R_2 M^2 |V_i|^2 \omega_s}{(R_1 R_2 - \omega L_1 \omega_s L_2 \sigma)^2 + (R_1 \omega_s L_2 + R_2 \omega L_1)^2} \\ &= -\frac{N_p M^2 |V_i|^2}{2L_2} \times \frac{1}{\sqrt{R_s^2 + (\omega L_1)^2} \sqrt{R_s^2 + (\omega L_1 \sigma)^2} - R_s \omega L_1 (1 - \sigma)} \\ &= -\frac{N_p (1 - \sigma) |V_i|^2}{2L_1 \sigma \omega^2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_s}{\omega L_1}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{R_s}{\omega L_1 \sigma}\right)^2} - \frac{R_s (1 - \sigma)}{\omega L_1 \sigma}} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (10) \end{aligned}$$

$$\text{ここで, } R_s = R_1 + R, \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

さらに、二次入力 P_{2bd} との関係は以下のように表される。ここで, $\tau_1 = L_1 / R_s$ とする。

$$\begin{aligned} P_{2bd} = \omega \tau_{bd} &= -\frac{N_p (1 - \sigma) |V_i|^2}{2L_1 \sigma} \\ &\times \frac{\tau_1}{\sqrt{1 + (\omega \tau_1)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \tau_1}{\sigma}\right)^2} - \frac{(1 - \sigma)}{\sigma}} \quad [\text{W}] \quad (11) \end{aligned}$$

3. 回生ブレーキ性能曲線

<3.1> 現行の回生性能曲線 従来の典型的な電気ブレーキ特性について、図5を用いて説明する。簡単のために通常使用される最大ブレーキ時の回生ブレーキ性能曲線とする。性能曲線上の各諸量は、(1)~(10)式の関係から導出した。図4~9に示す添字の0は、現行の回生ブレーキ性能曲線における各値を表す。以下では、インバータの半導体素子の電流容量と架線電圧の制限より $I_m = 222[\text{A}]$, $V_i = 1300[\text{V}]$ を上限値として発電抵抗を挿入したときの回生性能曲線について検討した。なお、歯車伝達効率は0.95とし、インバータ効率は無視した。

図4において、最高速度 130[km/h] (このとき $F_0 = -764[10 \times \text{N}]$) から速度 80[km/h] までは、端子電圧 V_m とすべり角周波数 ω_s を一定としている。列車速度の低下 (ω_{2n} の減少) につれて電気ブレーキ力 F_0 は、回転子角周波数 ω_{2n} の逆数の2乗 $1/\omega_{2n}^2$ に比例し、速度 80[km/h] で定トルク領域(このとき $F_0 = -2136[10 \times \text{N}]$)に達する。この領域 (130→80[km/h]) は特性領域である。

さらに速度が低下すると、端子電圧 V_m が一定ですべり角周波数 ω_s が回転子角周波数 ω_{2n} に比例して減少する。この時、磁束は一次角周波数 ω_1 に逆比例し、徐々

図4 回生ブレーキ性能曲線 (現行)
Fig. 4 Conventional characteristic curves of regenerative brake. (conventional)

図5 回生ブレーキ性能曲線 ($R=0[\Omega]$, 高速域電流増加)
Fig. 5 Characteristic curves of regenerative brake. ($R=0[\Omega]$, increasing current in the high speed range.)

図6 抵抗挿入時における停動トルク特性
Fig. 6 Characteristic curves of break down torque with resistor.

図7 回生ブレーキ性能曲線 ($R=1[\Omega]$)
Fig. 7 Characteristic curves of regenerating brake. ($R=1[\Omega]$)

図8 回生ブレーキ性能曲線 ($R=2[\Omega]$)
Fig. 8 Characteristic curves of regenerating brake. ($R=2[\Omega]$)

図9 回生ブレーキ性能曲線 ($R=3[\Omega]$)
Fig. 9 Characteristic curves of regenerating brake. ($R=3[\Omega]$)

に強められていく。速度 55[km/h]まで減速すると磁束は最大値をとる。速度 80[km/h]から速度 55[km/h]の領域は、弱め磁束領域である。図 4 では弱め磁束領域において定トルクとなるように電流を与えている。

速度 55[km/h]以下では、端子電圧 V_m は一次角周波数 ω_1 に比例し磁束は一定に制御される。本論文では、端子電圧 V_m が一次角周波数 ω_1 に比例する領域を直線加速領域と呼ぶ。

現在の一般的なブレーキ方式では、運転士の扱うノッチに応じて要求される減速度から編成全体のブレーキ力を演算し、電気ブレーキ力を優先的に用いる。そして、電気ブレーキ力のみでは不足する編成ブレーキ力を機械ブレーキ力で補う仕組みとなっている。例えば、電動車 3 両と付随車 5 両の 8 両編成車両の場合を考える（以降、電動車を M 車、付随車を T 車と呼ぶことにする。この場合は 3M5T 編成車両となる）。要求される減速度を、3M 車の電気ブレーキのみで満たすことができないと、編成ブレーキ力と電気ブレーキ力との差を機械ブレーキが負担することになる。そのため、速度 80[km/h]以上の高速域においては、編成ブレーキ力の大部分を機械ブレーキが受け持つ。

< 3. 2 > 高速域において電流を増大させた回生性能曲線 図 5 は高速域において電流ピーク値を維持したままの状態にしたときの電気ブレーキ力 F_o とその時の各特性を示した。停動トルクを超えない範囲で、主電動機の高速度域の出力及び熱的容量を増加させた場合に相当する。

< 3. 3 > 高速域において発電抵抗を挿入した回生性能曲線 図 6 は、速度 55[km/h]より高速域において、発電抵抗値 $R_s=1, 2, 3[\Omega]$ を挿入した時の停動トルク特性を示す。 F_{bd} は停動トルク T_{bd} をブレーキ力に換算した値である。添字の bd0 は抵抗を挿入しない場合であり、bd1, bd2, bd3 は発電抵抗 $R_s=1, 2, 3[\Omega]$ を挿入した場合である。

図 7 は高速域において発電抵抗 $R=1[\Omega]$ を挿入したときの回生性能曲線を示す。速度 130[km/h]から減速し、速度 98[km/h]で定トルク領域（弱め磁束）のブレーキ力（このとき $F=-2136[10 \times N]$ ）に達する。その際、定トルクの値に達するまで電流実効値 I_m はピーク値（222[A]）をとることとする。また、インバータ交流出力端子電圧 V_i は、直流架線電圧の制限約 1700[V]に対応する交流 1300[V]の値を上限とする。回生ブレーキ時は、発電抵抗による電圧降下分だけ主電動機端子電圧をインバータ端子電圧上限（1300[V]）より上昇させることができる。従って、停動トルクは端子電圧の 2 乗に比例することから、高速域（定電圧領域）において電気ブレーキ力が増大する。主電動機端子電圧 V_m は最大 1600[V]であった。但し、低速域では各ノッチによって設定される一定のトルクをとるため、抵抗挿

入によりトルクを増大させる必要がない。そのため、架線への回生効率低下を防ぐ目的で、直線加速終端（55[km/h]）において発電抵抗を短絡させている。このような回生ブレーキ力特性を与えると、速度 64[km/h]において直線加速領域の限流値（定トルク域における電流値）と等しくなり、速度 64[km/h]以下では直線加速領域となる。速度 55[km/h]まで減速すると、主電動機端子電圧は 1300[V]となる。この制御方式によると、直線加速領域は 0～55[km/h]から 0～64[km/h]まで拡大し、定トルク領域は 98[km/h]まで拡大できた。

図 8、図 9 は、図 7 の場合と同様な方式で、2[Ω]と 3[Ω]の発電抵抗を挿入した場合の回生性能曲線を示した。3[Ω]ではほぼ全速度域で定トルク領域の値をとることが可能である。主電動機の最大端子電圧 V_m はそれぞれ 1900[V]と 2150[V]となった。

表 2 制御領域
Table.2 Control range

抵抗値 \ 制御領域	定トルク域 [km/h]	特性領域 [km/h]
$R=0[\Omega]$	0～80	80～130
$R=1[\Omega]$	0～98	98～130
$R=2[\Omega]$	0～115	115～130
$R=3[\Omega]$	0～129	129～130

以上の検討から、回生ブレーキ時に発電抵抗を挿入することで、高速域において電気ブレーキ力を増大させることが示された。

4. 電気ブレーキ性能評価

本節では、表 3 に示した 3M5T 編成電車をモデルとして、前節で示した回生ブレーキ性能曲線を用いて走行した時の RMS 電流⁽⁸⁾とブレーキ時における運動エネルギー処理について検討する。

< 4. 1 > RMS 電流 図 10 は、検討に用いた走行曲線を示している。駅間は 5[km]である。停止状態から最大加速度で 130[km/h]まで加速を行い、惰行、減速（減速度 3[km/h/s]）し停止に至っている（現在の一般的な運行ダイヤでは、減速度 2～3[km/h/s]の範囲で減速している）。

このような走行パターンにおいて、図 4～9 に示した回生性能曲線の特性を用いて減速させると、主電動機の実効値電流 I_m の特性が高速域でそれぞれ異なる。主電動機の銅損による温度上昇は、絶縁材料の寿命に大きな影響を与える。そのため、各走行計算毎に、銅損による温度上昇に対応する、走行開始時点からの RMS 電流 I_{rms} を(12)式より求めた⁽⁸⁾。

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 dt} \quad [A] \quad (12)$$

ここで、 t :時間、 T :走行に要した時間

表4は、図4から図9の回生ブレーキ特性を用いて図10の走行曲線に沿って走行した時のRMS電流を示す。

図10 走行曲線
Fig. 10 Run curve

現行(図4)に対し、高速域で電流を増大させる場合(図5)と発電抵抗1[Ω]挿入時(図7)の場合は、RMS電流が増加した。また、2[Ω]、3[Ω]の発電抵抗を挿入した場合(図8、図9)では、現行よりも減少した。走行曲線における力行時の特性はどの場合でも同じであり、ブレーキ時の減速度は一定である。今回検討に用いた回生性能曲線では、弱め磁束領域で定トルク運転を行う速度域において、すべり周波数の調節によりトルク電流を増加させている。発電抵抗挿入により直線加速終端が高速側に拡大されると、弱め磁束領域において電流実効値 I_m が現行に比べ減少する。発電抵抗の値を増加させれば、より高速側まで定トルク領域が拡大し、RMS電流が減少する。

表3 3M5T編成車両の構成
Table.3 Structure of train set (3M5T)

電動車3両(3M) (運転台付車両1両を含む)	115,900 [kg]
付随車5両(5T) (運転台付車両1両を含む)	148,400 [kg]
荷重(満車)	17,000[kg]/両
編成ブレーキ力 (減速度-3.0[km/h/s])	33,359[10×N]
電動車(1M)あたりの主電動機数	4 個
編成電気ブレーキ力(3M) (定トルク域)	25,636 [10×N]

表4 RMS電流
Table. 4 RMS current

現行	電流増大 (高速域)	R=1[Ω]	R=2[Ω]	R=3[Ω]
148.6[A]	152.7[A]	150.6[A]	148.7[A]	147.1[A]
100.0 (%)	102.8 (%)	101.3 (%)	100.1 (%)	99.0 (%)

<4・2>エネルギーと電力 本節では、ブレーキエネルギー処理の内訳とピーク電力について検討して

いる。

(1) ブレーキエネルギー分担率 最高速度130[km/h]から停止まで減速度3[km/h/s]で減速するために、表3に示す編成ブレーキ力(33,359 [10×N])を与えた。このとき、電気ブレーキと機械ブレーキが編成車両の運動エネルギーを吸収する。そこで、電気ブレーキと機械ブレーキが吸収するエネルギーの分担比と、主電動機の吸収電力及び架線への回生電力を調べた。

電気ブレーキ分担率と回生ブレーキ分担率について以下に定義する。

電気ブレーキ分担率

$$= \frac{\text{主電動機発電エネルギー}}{\text{編成車両運動エネルギー}} \times 100 [\%] \quad (13)$$

回生ブレーキ分担率

$$= \frac{\text{架線に戻るエネルギー}}{\text{編成車両運動エネルギー}} \times 100 [\%] \quad (14)$$

図11は、現行の回生ブレーキ力特性を用いて編成車両を130[km/h]から減速度3[km/h/s]で減速させたときの回生電力量を示している。

ここで、

V_t [km/h]: 編成車両の速度、

E_v [kWh]: 編成車両の運動エネルギー

E_m [kWh]: 編成車両の主電動機発電エネルギー

E_r [kWh]: 架線への回生エネルギー

$E_v - E_m$ [kWh]: 機械ブレーキで受け持つエネルギー

$E_m - E_r$ [kWh]: 発電抵抗で受け持つエネルギー

P_v [kW]: 編成車両のパワー

P_m [kW]: 主電動機のパワー

P_r [kW]: 架線への回生パワー

$P_v - P_m$ [kW]: 機械ブレーキで受け持つパワー

$P_m - P_r$ [kW]: 発電抵抗で受け持つパワー

図12は図5の回生性能曲線をもとに、発電抵抗を用いないで、高速域においてピーク電流実効値(222[A])を越えないようにブレーキ力を増大させた場合の各電力及び電力量を表している。高速域でトルクを増大させているため、現行よりも電気ブレーキ分担率及び回生ブレーキ分担率は5.2[%]増加した。

発電抵抗を挿入した場合を図13、14、15に示す。 P_r は架線へ返る電力を表す。主電動機が発電するパワー P_m と P_r との差が発電抵抗により消費されるパワーとなる。

図16は130[km/h]から80[km/h]まで、図17は130[km/h]から0[km/h]までのブレーキ時(減速度3[km/h])における編成車両の運動エネルギー処理の内訳を示す。図中の各棒グラフの無色部分が機械ブレーキが吸収するエネルギーであり、その他は、主電動機

図 1 1 回生電力及び電力量線図 (現行)
Fig. 11 Regenerative power and electric energy.

図 1 2 回生電力及び電力量線図 (高速域電流増大)
Fig. 12 Regenerative power and electric energy.
($R=0[\Omega]$, current increased in the high speed range.)

図 1 3 回生電力及び電力量線図 ($R=1[\Omega]$)
Fig. 13 Regenerative power and electric energy. ($R=1[\Omega]$)

図 1 4 回生電力及び電力量線図 ($R=2[\Omega]$)
Fig. 14 Regenerative power and electric energy. ($R=2[\Omega]$)

図 1 5 回生電力及び電力量線図 ($R=3[\Omega]$)
Fig. 15 Regenerative power and electric energy. ($R=3[\Omega]$)

が吸収したエネルギー (発電抵抗で消費されるエネルギーと架線へ返るエネルギー) である。

編成車両の速度 130[km/h]から 80[km/h]まで減速するときの運動エネルギーは 42.4[kWh]である。図 1 7 から速度 130[km/h]において、編成車両の全運動エネルギーは 68.9[kWh]となるため、130[km/h]から 80[km/h]まで減速する間に、全運動エネルギーの約 62[%]を処理しなければならないことになる。

図 1 6 には、5M3T と 6M2T 編成車両に、現行の回生性能曲線を用いて 130[km/h]から 80[km/h]まで減速

(減速度 3[km/h/s]) する間の電気ブレーキエネルギーも合わせて示してある。電気ブレーキで処理したエネルギーが発電抵抗 3[Ω]挿入時には 30.5[kWh]であり、5M3T では 28.1[kWh]、6M2T では 32.0[kWh]であった。言い換えると、発電抵抗 3[Ω]挿入時には 5.5M2.5T 編成相当の電気ブレーキエネルギー処理能力があると考えることができる。

(2) ピーク電力 表 5 は、架線への回生ピーク電力を表している。発電抵抗値が大きくなるにつれ、回生ピーク電力が小さくなる。発電抵抗 3[Ω]の場合では、現行に対して約 70[%]となった。

表 5 架線への回生ピーク電力

Table. 5 Peak regenerative power to trolley wire.

現行	$R=1[\Omega]$	$R=2[\Omega]$	$R=3[\Omega]$
5,102[kW]	4,582[kW]	3,941[kW]	3,551[kW]
100.0 [%]	89.8 [%]	77.2 [%]	69.6 [%]

表 6 主電動機の発電ピーク電力

Table. 6 Peak regenerative power of main motor.

現行	$R=1[\Omega]$	$R=2[\Omega]$	$R=3[\Omega]$
5,102[kW]	6,358[kW]	7,475[kW]	8,450[kW]
100.0 [%]	124.6 [%]	146.5 [%]	165.6 [%]

図 1 6 ブレーキエネルギーの内訳 (130→80[km/h])
Fig. 16 Details of braking energy of train set.

同一き電区間において回生電力を消費する負荷車両が少ないと、回生失効（回生電力を返すことができず電気ブレーキが絞られ、機械ブレーキが立ち上がる場合）が少なからず生ずる。発電抵抗を挿入した電気ブレーキ方式は、軽負荷となりやすい線区に対し、回生失効を低減させることが期待できる。

主電動機の発電ピーク電力を表 6 に示す。発電抵抗 3[Ω] 挿入時の主電動機発電ピーク電力は、現行に対し 165.6[%]となる。

< 4・3 > 回生電力量と発電抵抗値の設定 発電抵抗の最適値は、走行する線区により異なる。

例えば、高密度輸送線区（山手線や中央線など）の場合、絶えず負荷となる車両が存在するため、省エネルギーの観点から架線への回生電力量は減らさないことが求められる。そのため、発電抵抗の値はあまり大きくない方が望ましい。これに対して、負荷となる車両が少ない閑散線区に対しては、できるだけ電気ブレーキを生かすために、発電抵抗の値を大きめに設定することが望ましい。（上記はほんの一例であり、車両や線区によって要求される性能が変わる。）

発電抵抗を車両速度に応じて切り替えることが可能であれば、架線への回生電力量を現行とほぼ同じにすることができる。そこで、3[Ω]の発電抵抗を挿入した時と同じ電気ブレーキ力（ほぼ全速度域が定トルク）が得られるように、発電抵抗値を列車速度に応じて 3→2→1[Ω]と切り替えた場合の運動エネルギー処理の内訳を図 1 6 に可変抵抗と注記して示す。

また、開閉器と発電抵抗を搭載する際のスペースと重量の増加に関しては、抵抗制御電車の抵抗器の容量及び重量を参考にすると、スペース的にはさほど問題なく、1 M 当たり 1 トン程度の重量増である。3 M 5 T 編成車両の荷重を含めた全重量は約 4 0 0 トンである。3M 車両分で 3 トン程度の重量増となるため、編成重量に対する増加割合は 1 % 程度となる。従って、編成全体に対する重量増加は軽微であり、力行時のエネルギー消費への影響は比較的少ない。

図 1 7 ブレーキエネルギーの内訳 (130[km/h]→0[km/h])
Fig. 17 Details of braking energy of train set(3M5T)

< 4・4 > 主電動機の耐電圧 抵抗挿入時には主電動機の端子電圧が通常回生時よりも上昇するため、主電動機の耐圧を考慮しなくてはならない。JIS E 6102 鉄道車両用—交流電動機—試験方法によれば、 $2.25E+2,000[V] \approx 5,400[V]$ を印加する耐電圧試験を行っている。（ここで E は架線電圧 1,500[V]）

架線電圧の変動範囲は、900V～1,900[V]であり、この最大値に対応する交流電圧は 1,482[V]である。架線電圧が 1,500[V]において、力行時には主電動機端子電圧には約 1170[V]の実効値電圧が加わる。

力行中においても、主電動機に加わる電圧が、定格の約 1.26 倍にまで上昇する。1 [Ω] の発電抵抗挿入時には、最大 1.36 倍（主電動機の実効値電圧 1,600[V]）である。このため、電圧上昇分の影響には、検討が必要と考えるが、これまでの鉄道車両における主電動機の使い方（例えば、旧国鉄 103 系電車では、定格 375[V]の直流電動機を、発電ブレーキ時には最大 800[V]で使用している）を考えると、1 [Ω] 程度の発電抵抗を用いる場合は、既存の主電動機をそのまま使用できる可能性がある。発電抵抗が 3[Ω]の場合は、主電動機の最大端子電圧は 2,150[V]となり、現行に対して 1.65 倍の電圧となる。既存の主電動機を用いる場合、サージ電圧などによる絶縁への影響を考慮する必要があるかもしれない。

5. おわりに

インバータや主電動機の電圧・電流の制約により高速域における電気ブレーキ力が小さい場合、高速域からのブレーキは、現状では機械ブレーキに大きく頼らざるを得ない。高速域では、編成車両の運動エネルギーが大きいため、機械ブレーキに大きな負担が掛かる。

本論文では、機械ブレーキのメンテナンス軽減に寄与する、発電抵抗を用いた高速域における電気ブレーキ力増大の検討を行った。その結果を以下に要約する。

(1) 発電抵抗を用いることで、インバータ容量を増やさずに、高速域の電気ブレーキ力を増大する方法を

提示した。

(2)機械ブレーキの負担減により、制輪子の交換周期や車輪削正の周期の延長が見込まれる。

(3)本論文で検討した 3M5T 編成電車において 3[Ω] の発電抵抗挿入した場合では、高速域 (130→80[km/h]) において 5.5M2.5T 相当の電気ブレーキ能力 (減速度 3[km/h/s]) がある。

(4)同一き電区間において、力行車が少ない軽負荷時の回生失効を抑制することができる。

(5)主電動機の耐電圧次第では、既存のモータに即適応できる可能性が高い。

今回は、直流き電区間を走行する近郊電車をモデルに検討したが、交流き電区間を走行するインバータ車の場合でも、電気ブレーキ力の増大は同様と考えている。今後は、主電動機の抵抗短絡時の制御安定性について検討を行う予定である。

(平成 12 年 3 月 2 日受付, 同 12 年 8 月 9 日再受付)

小笠 正道

(正員) 昭和 41 年 5 月 31 日生。平成 2 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月 (財) 鉄道総合技術研究所入社。現在、同車両制御技術研究部駆動制御グループ副主任研究員。電気鉄道車両の性能、電力変換技術の研究開発に従事。計測自動制御学会会員。

渡邊 朝紀

(正員) 昭和 24 年 4 月 9 日生。昭和 47 年 4 月東京大学工学部電気工学科卒業。同年 5 月国鉄入社。現在、(財) 鉄道総合技術研究所車両制御技術研究部制御グループ主管研究員。電気鉄道車両の性能、粘着制御、列車制御、電力変換制御の研究開発に従事。計測自動制御学会会員。IEEE 会員。

参考文献

- (1) 曾根, 芦屋: 「電車の純電気ブレーキ化」 第 34 回鉄道サイバネ, 513, pp.194/197, 1997
- (2) 小笠, 永井, 渡邊, 戸田: 「零速までの電気ブレーキ試験台試験」 電学論 Vol.119D, No.3, March, 1999
- (3) 渡邊, 小笠: 「停止まで使える電気ブレーキ」 RRR, 56 巻 2 号, p10/15, 1999
- (4) 佐藤, 宮路: 「純電気ブレーキの使用実績について」 第 36 回鉄道サイバネ, 515, p194/197, 1999
- (5) 渡邊: 「鉄損を考慮した誘導機の定常特性解析」 回転機研究会資料, RM-00-5, 2000
- (6) 中沢, 戸田, 安岡: 「電圧固定モードでの誘導電動機ベクトル制御」 電学論 D, 118 巻 9 号, 平成 10 年
- (7) 土谷, 江上: 現代制御工学 (産業図書)
- (8) 川添: 交流電気車両要論 (電気車研究会) 1971
- (9) 山下, 小笠, 渡邊: 「高速域における電気ブレーキ範囲拡大の検討」 平成 11 年電気学会産業応用 I -121 p387/388

山下 道寛

(正員) 昭和 46 年 1 月 29 日生。平成 5 年北見工業大学電気工学科卒業。平成 10 年 3 月北海道大学工学研究科システム情報工学専攻博士課程修了。同年 4 月, (財) 鉄道総合技術研究所入社。現在、同車両制御技術研究部駆動制御グループ研究員。誘導電動機制御、粘着制御の研究開発に従事。計測自動制御学会会員。博士 (工学)