

直流電気鉄道における回生制動有効活用のための 車両および電気システム

岡田万基*, 古関隆章 (東京大学)

Vehicle and electrical system for effective usage of regenerative brake in DC-electrified railway
Yuruki Okada*, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Abstract

Currently, many electric trains are equipped with regenerative braking systems, which convert kinetic energy of the braking trains into electrical energy and the other powering trains consume the electrical energy. However, conventional vehicles and electrical systems do not enable effective usage of regenerative braking systems in DC-electrified railways. The authors investigate possibility of introducing substations which have regenerative inverter, energy storage systems *etc.* regarding the characteristics of the vehicles based on present technical level. They evaluate effects of these solutions for effective usage of regenerative braking system based on the calculation of the electrical circuit in computer environment.

キーワード：回生ブレーキ，回生絞り込み，エネルギー蓄積装置
(regenerative brake, squeezing control of regenerative power, energy-storage equipments)

1. はじめに

回生制動を用いて，列車の運動エネルギーを制動時に電力として回収し，力行中の他の列車で有効に利用する回生ブレーキを持つ車両が今日広く用いられるようになってきているが，現在の多くの直流電気鉄道では，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生かすことができるシステムとはなっていない^{[1][2][3]}。

そこで，本研究では，将来の鉄道直流電気システムを視野に，現在の技術水準をもとに，回生の能力を持つ変電設備や，電力蓄積装置の設置の可能性を検討し，車両の特性設定との関係を論じて，その効果を，電力システムの計算をもとに評価，比較検討する。

2. 現在の回生絞り込み制御の問題点

2.1 直流電気鉄道と回生ブレーキ

Fig.1 に直流電気鉄道における，回生ブレーキ動作時の電力の流れを示す。一般に，変電所が電力回生機能を持たないため，回生ブレーキにより発生した電力は，同じ路線上の力行車で消費されなければならない。このような制約の下，回生ブレーキに関し，以下の問題が指摘されている^[4]。

1. 路線上の力行車の消費電力が小さい場合には，所要のブレーキ力を得られない。
2. 力行車の消費電力が減少する際に動作する「回生絞り込み制御」に問題がある。
3. 回生ブレーキと空気ブレーキの応答速度の違いからブレーキ力が変動する。

2の「回生絞り込み制御」に関しては，2.2節で詳しく述べる。また，3に関して，停止間際に回生ブレーキが作用しなくなった場合，空気ブレーキの応答速度が遅いことから，停止精度に大きく影響することも指摘されている。

2.2 「回生絞り込み制御」の問題点

直流電気鉄道において，回生ブレーキ動作中に，力行車の電力消費が減少する場合に，パンタ点が過電圧となるのを防ぐため，電力回生を行っている列車は，回生電力を減少させる制御を行っており，これを「回生絞り込み制御」と呼んでいる。具体的には，Fig.2 実線のように，パンタ点電圧に応じて，その電圧で流すことのできる電動機電流を決めておき，その特性に従って，電力変換装置（電気車の電動機の駆動制御を行う装置）が電動機電流を減少させることにより，回生電力を絞り込んでいる。しかし，現在の回生絞り込み制御では，以下のような理由から，過剰に回生電力を絞り込んでいることが指摘されている。

1. パンタ点電圧の上昇に寄与するのがインバータの入力側直流電流であるのに対し，電動機電流で絞り込みを行っている。
2. 回生絞り込み特性が，パンタ点の最大許容電圧よりも，かなり低い電圧で設定されている。
3. 実際の動作点が，設定された特性よりも内側にある。

2.3 なぜ，回生絞り込み制御が過剰なのか？

現在の直流電気鉄道においては，大きく分けて，以下の3種類の制御方式を持つ列車が運行されている。

1. VVVF インバータ制御車
2. 界磁チョッパ制御車
3. 抵抗制御車

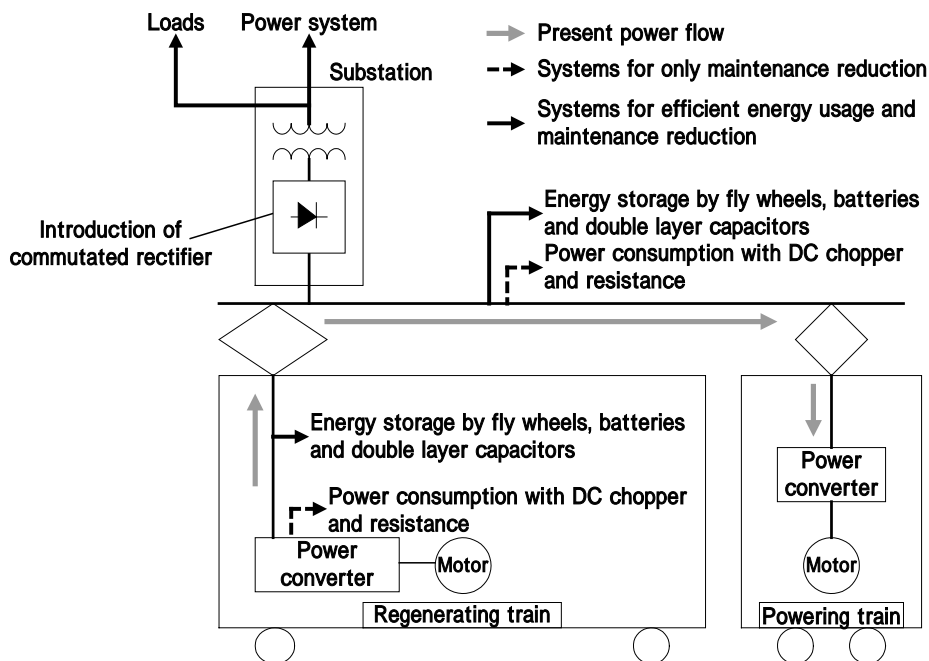


図1 直流電気鉄道における回生電力の流れ
Fig.1 Regenerative braking in DC-electrified railway

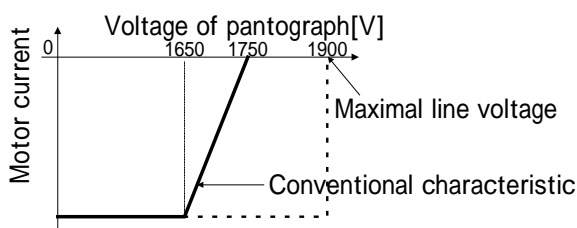


図2 回生絞り込み制御の特性
Fig.2 Characteristics of squeezing control

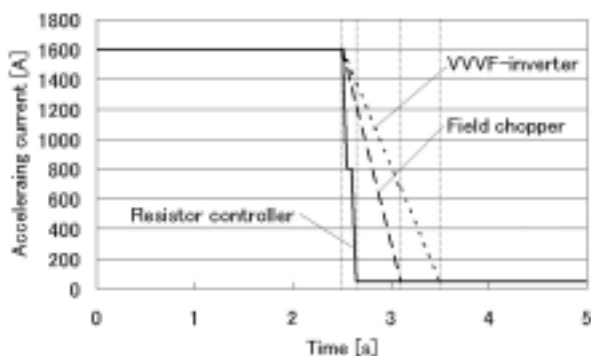


図3 力行電流の遮断速度
Fig.3 Speed of current reduction

これらの列車においては、Fig.3 に模式的に示すように、列車が力行を止める際の、電流遮断の速さが異なる。

一般に、この電流遮断が速いほど、同じ路線上で電力回生を行っている列車での、パンタ点での電圧上昇が大きくなる。従って、電力変換装置が連続的に力行電流を減少さ

せる界磁チョッパ制御やインバータ制御の列車に比べ、スイッチの開放により力行電流を遮断する抵抗制御の列車が力行を止める際には、電力回生を行っている列車のパンタ点での電圧上昇は大きくなる。

一方、電力回生を行っている車両の回生絞り込み制御では、パンタ点での電圧を観測しながら、電動機電流を減少させるため、必然的に、抵抗制御の列車が力行を止める場合を想定して、その特性が設定される。具体的には、パンタ点が過電圧とならないよう、低めの電圧で電動機電流を減少させることになる。しかし、界磁チョッパ制御やインバータ制御の列車は、抵抗制御の列車に比べて、十分に長い時間をかけて力行電流を減少させるため、電圧の上昇幅は小さい。従って、抵抗制御の列車の力行電流遮断特性に依存して設定された、回生絞り込み制御の特性では、過剰に電動機電流を減少させてしまう。

4. 本研究の位置付け

3節で、直流電気鉄道の問題点について述べたが、本研究では、どのように、路線上で回生電力を吸収するのか、また、現在の回生絞り込み制御を改善すれば良いのか、という点に焦点をおき、回生ブレーキ有効活用のための車両および電気システムについて、以下の点を検討する。

まず、Fig.1 に示される回生電力吸収設備として、以下の設備の導入が考えられる。

1. 変電所における、電力系統側への電力回生設備
2. 地上および車上におけるブレーキ用抵抗器
3. 地上および車上における電力貯蔵装置

また、以下の点に関して、定量的な評価をし、設備導入の一つの指針となるよう、これらを取りまとめる。

1. 電力消費（回生）量
2. 保守コストの削減
3. 電力利用率

次に、回生絞り込み制御に関して、現在の制御に対し、どのような情報が得られれば、どのように制御を改善できるのか、という点について、定量的検討を含め、提案する。

以上、回生電力吸収設備および回生絞り込み制御に関して、本研究での位置付けを述べたが、これらの特性は、決して独立に決定されるべきものではなく、互いの協調を考慮した上で、車両や地上設備に導入される必要がある。従って、本研究では、車両の特性と回生電力吸収設備の協調についても検討する。

5. 回生電力有効活用のための基本的な検討

5.1 本発表での検討内容

本発表では、回生電力有効活用のための初歩的な検討として、以下の2点を探り上げ、特に1に関しては、電気回路の過渡現象も考慮し、検討を行った。

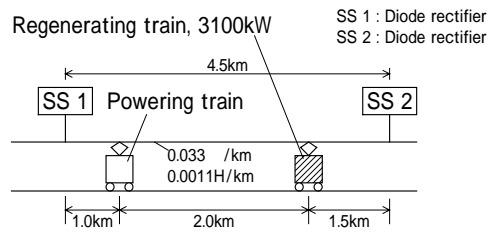
1. 回生電力吸収設備がない場合に、いくつかの制御方式をもつ列車の力行電流遮断特性に対して、電力回生を行っている車両のパンタ点電圧の変動を検討
2. 回生電力吸収設備に関して、電力回生時の、変電所のブレーキ用抵抗器による効果を検討

以下、それぞれについて、詳細な内容を述べる。

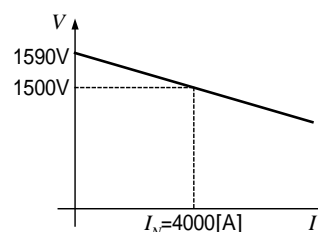
5.2 力行電流遮断時の電圧変動

力行電流遮断時の、電力回生を行っている列車のパンタ点での電圧変動を、Fig.4(a)のモデルを用いて検討した。変電所SS1および2の電流電圧特性は、Fig.4(b)に従うものとする。このモデルでは、力行車と電力回生を行っている列車との距離が比較的短く、電力回生を行いやすい状況にあるため、力行電流の多くを回生電流により負担することになる。また、回生絞り込み制御の特性は、Fig.4(c)に示すように、回生可能な最大電圧付近で急峻に電流を減少させる特

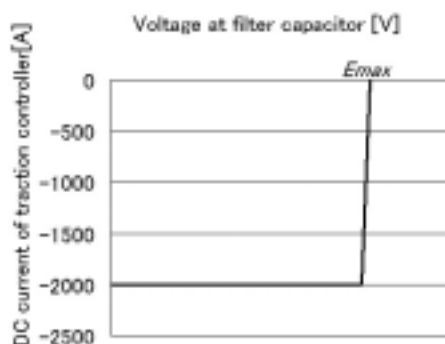
性としている。従って、本モデルでは、電力回生を行っている車両のパンタ点の電圧が、力行車の力行電流の変動による影響を受けやすい設定となっている。つまり、電圧変動の評価に関して、比較的不利なモデル設定となっている。



(a) Composition of model for experiment



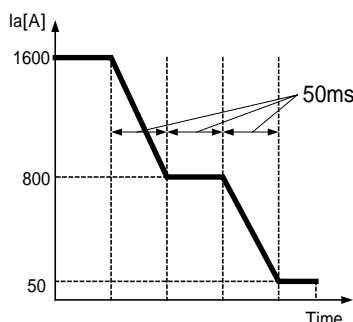
(b) V-I Characteristics of SS1 and SS2



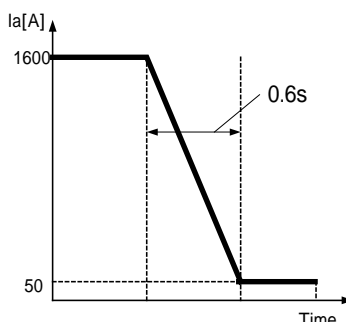
(c) Characteristics of squeezing control

図5 電圧変動検討のためのモデル

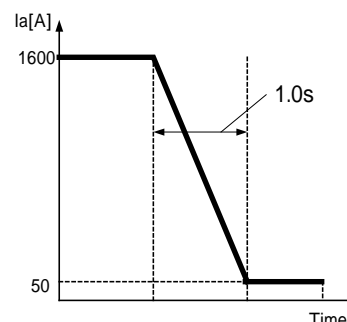
Fig.5 Model for experiment (1)



(a) Resistor control



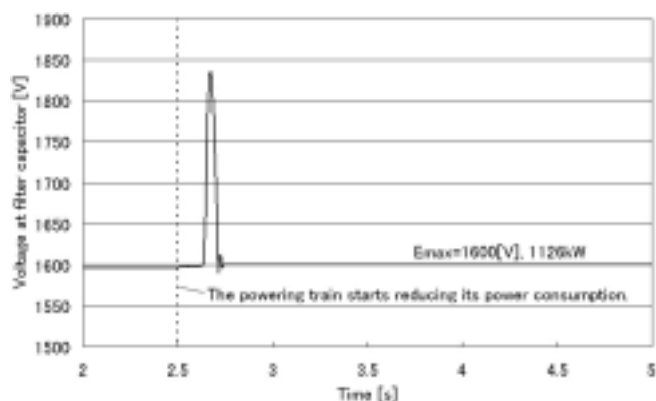
(b) field-chopper control



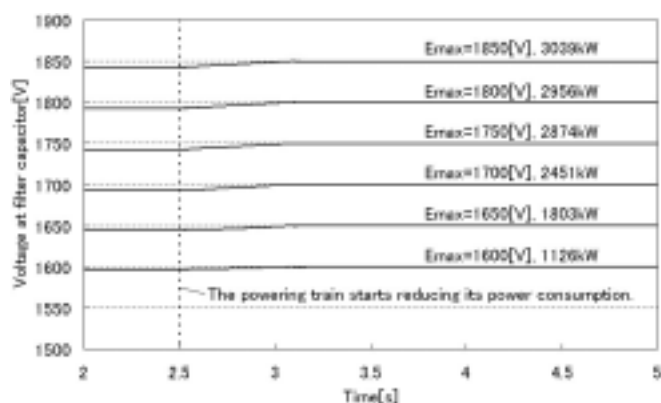
(c) VVVF-inverter control

図5 典型的な力行電流の遮断特性

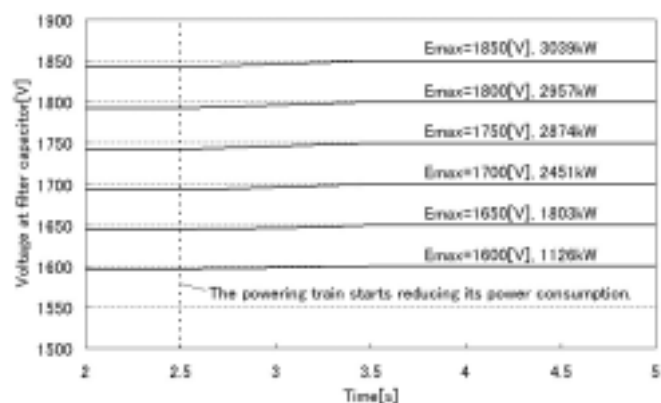
Fig.5 Typical characteristics of current reduction for powering trains with some control methods



(a) In case the powering is resistor-controlled.



(b) In case the powering train is field-chopper controlled.



(c) In case the powering train is VVVF-inverter controlled

図6 回生車のパンタ点電圧変動

Fig.6 Voltage regulation at pantograph of the braking train

また、力行車の各制御方式における力行電流の遮断特性は Fig.5のように設定した。以上の状況設定において、各制御方式の力行車が、力行電流を遮断した際の、電力回生を行っている列車のパンタ点電圧の変動を、Fig.6に示す。これらの結果、力行車が抵抗制御の場合には、力行電流遮断の遮断が速いため、電圧の変動が大きい。これに対し、界磁

チョッパ制御およびインバータ制御の場合には、力行車が、比較的長い時間をかけて、力行電流を連続的に減少させるため、Fig.(c)での E_{max} を高く設定しても、パンタ点での電圧変動はほとんどなく、安定して回生電流を減少させることができることが分かる。

5.3 ブレーキ抵抗器導入による効果

本節では、Fig.7(a)に示すモデルにおいて、変電所にブレーキ抵抗を設置した場合の、回生電力について評価する。また、SS1 および 2 の電流電圧特性は Fig.4(b)に従い、SS2 のブレーキ用抵抗は直流チョッパ装置により、1620V で定電圧制御を行うものとする。加えて、電力回生を行う列車の回生絞り込み制御には、Fig.7(b)に示す特性を設定した。

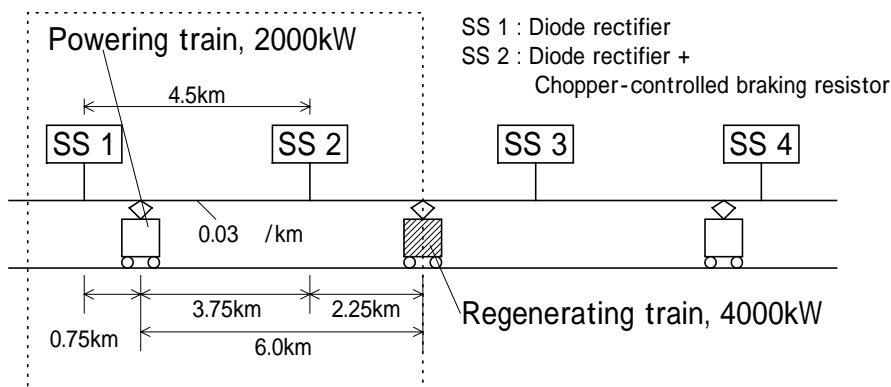
本モデルでは、中央の列車において、全ブレーキを回生ブレーキで負担した場合の回生電力が 4000kW であるものとし、両端の力行車が 2000kW ずつ消費するものとする。また、実際の計算では、回路の対象性から、回生電力を半分とし、点線で囲まれた回路の左半分のみで計算を行った。以上の状況設定において、電力回生を行う列車から、実際どれだけの電力が回生されたか、また、回生された電力がどのように使われたかを、Fig.8 に示す。

まず、実際に回生された電力に関して、ブレーキ抵抗がない場合には、回生絞り込み制御により、2000kW の電力の要求に対して、1526kW しか回生できないのに対し、ブレーキ抵抗がある場合には、電力回生を行う列車に対して、近くに回生電力を吸収する負荷が存在するため、2000kW 回生可能となっている。

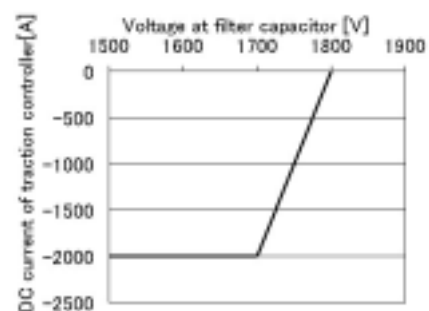
また、Fig.9 は、ブレーキ抵抗の有無での比較で、2000kW の電力回生の要求がどのように満足されたかを示している。それぞれの円グラフでは、斜線の部分が空気ブレーキにより補足された部分、塗りつぶされた部分が、回生された電力とその内訳を示している。この結果から、回生された電力のうち、力行車で消費された電力は、ブレーキ抵抗がない場合には 1364kW であるのに対し、ブレーキ抵抗がある場合には 828kW となった。これは、電力回生を行っている列車とブレーキ抵抗との距離が、力行車とのそれよりも短いため、ブレーキ抵抗が 1015kW の大きな電力を消費したためである。従って、本モデルでは、再利用できた電力は、結果として、ブレーキ抵抗のない場合の方が大きい。しかし、このブレーキ抵抗を、エネルギー蓄積装置で置き換えた場合には、今回、ブレーキ抵抗が消費した 1015kW 分の電力を蓄積することができるため（もちろん、装置の損失を考慮しなければならない）、結果として、エネルギー蓄積ができない場合と比べて、再利用できる電力の割合が大きくなる。

6. まとめと今後の課題

本稿では、現在の直流電気鉄道における問題点をまとめた。また、電力回生時の負荷確保という本質的な問題と、現在の回生絞り込み制御における問題に対する改善策を提

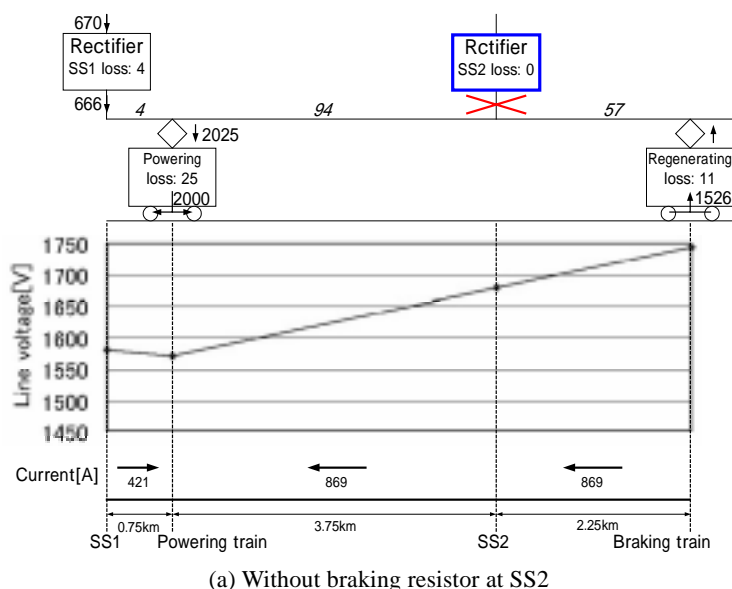


(a) Composition of model for experiment

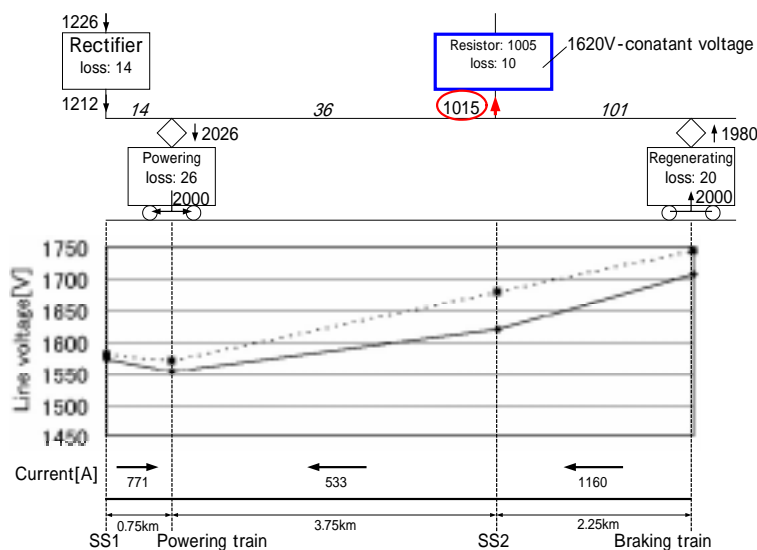


(b) Characteristics of *squeezing control*

図7 回生電力吸収の検討のためのモデル
Fig.7 Model for experiment (2)



(a) Without braking resistor at SS2



(b) With braking resistor at SS2

図8 回生電力の流れ

Fig.8 Evaluation of calculated power flow

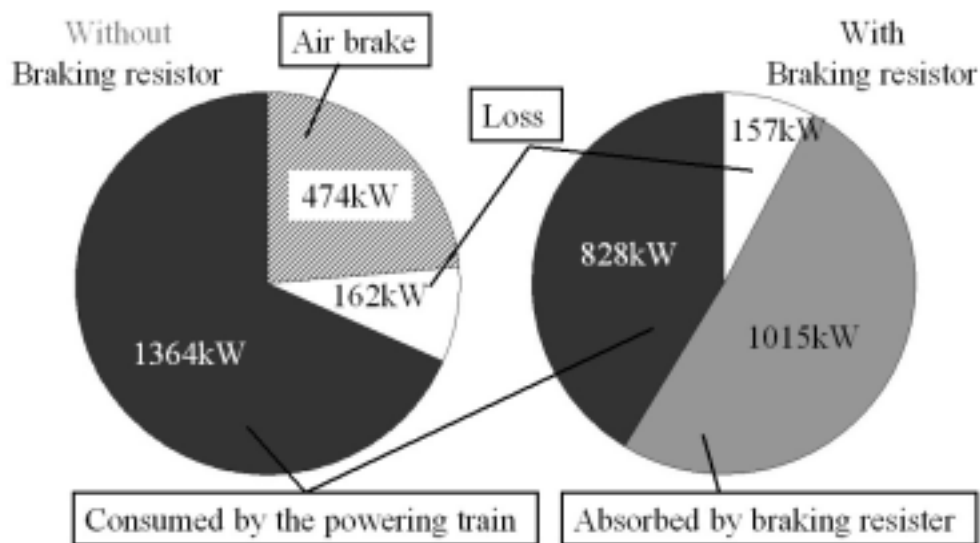


図9 回生電力の評価

Fig.9 Evaluation of regenerative power of the braking train

案するための簡単な検討を通して、以下の点を確認した。

1. 回生電力吸収設備がない場合、路線に抵抗制御の列車が存在する限り、過剰な回生絞り込みを行わなくてはならない。
2. 一方、力行電流の絞り込み数百 msec 以上かけてゆっくり行われる、界磁チョップ制御およびインバータ制御の列車のみが路線に存在する際には、路線の最大許容電圧近くまで、電力回生を行える。
3. 地上および車上への回生電力吸収設備の導入が、電力回生時の負荷を確保し回生失効を防止する上で顕著な貢献をする可能性を、基本的な回路計算を通じて定量的に示した。

また、今後の課題として、まず、回生絞り込み制御に関しては、車両の制御方式以外に、以下の情報を考慮した場合の、制御特性改善策の定量的な評価が必要である。

1. 電力回生を行っている列車の回生電力
2. 力行車と電力回生を行っている列車との位置関係
次に、回生電力吸収装置に関しては、回生電力吸収による省エネ効果の他、以下の点を評価すべきと考える。
 1. 回生電力増加による、空気ブレーキの使用頻度減少とメンテナンスコストの評価
 2. 電力利用率の改善

一般に、電気鉄道における変電所では、列車力行の際に大電力を消費し、惰行（列車が慣性で走行している状態）ではほとんど電力消費がなく、電力利用率が極端に悪くなる。そこで、2 に関しては、回生電力吸収装置により、列車回生の際の電力を吸収し、それを力行時に用いることで電力利用率をできると考えられ、その効果を具体的に評価する必要がある。

最後に、4 節でも述べたが、回生絞り込み制御と回生電力吸収設備は、決して独立して議論されるべきものではない

く、互いに協調をとった上で導入されるべきものであるから、それらの間の協調をどのように行うかについても、検討する必要がある。

参考文献

- [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（1999-8）
- [2] S. SONE: Re-examination of Feeding Characteristics and Squeezing Control of Regenerative Trains, Joint Technical Meeting Transportation and Electric Railway and Linear drives, TER-02-49/LD-02-64, pp.13-16 (2002-7) (in Japanese)
曾根 悟：回生車時代のき電特性と絞り込み特性の再検討，電気学会 交通・電気鉄道 リニアドライブ 合同研究会，TER-02-49/LD-02-64，pp.13-16 (2002-7)
- [3] 小笠 正道：回生ブレーキとエネルギー，鉄道車両と技術，No.78，pp.10-19（2002-7）
- [4] Y. OKADA, T. KOSEKI, S. SONE: Energy Management for Regenerative Brakes on a DC Feeding System, STECH'03, pp. 376-380（2003-8）

謝辞

本研究を進めるに当たり、全面的なご指導をいただいた工学院大学の曾根悟教授、また、具体的な回路計算のため、貴重なデータを頂戴した新京成電鉄殿、三菱電機殿に、この誌面を借りて、感謝の意を述べたい。