

# 直流電気鉄道への蓄電装置導入による回生車との 電力融通とその省電力効果の評価

野口 勝義\*, 古関 隆章 (東京大学)

## Electric Power Interchange among Powering / Regenerating Trains and Electric Energy Storage Components Additionally Introduced into a DC-Electrification System, and Evaluation of Its Energy-Saving Effects

NOGUCHI Katsuyoshi\*, KOSEKI Takafumi (The University of Tokyo)

### Abstract

A recent electric railways train has the regenerating brake system. The regenerating brake is useful for saving energy. However, sufficient deceleration cannot be obtained and additional mechanical braking force is necessary when its electrical load is small. By introducing the electric energy, energy storage components in DC-electrification system will effectively absorb the regenerating brake. The purpose of this research is to examine it quantitatively. Especially, it aims at the method of feeding two lines in a lump in this paper.

At first, we tried to check on the accuracy of the model by whom method of feeding two lines in a lump is introduced. Next, it made comparative study of the effect of the Energy-saving by using the model. We obtained the result in which introducing the method of feeding two lines in a lump is effective for the Energy-saving, and combining it and introducing energy storage components is effective.

キーワード : 回生ブレーキ, 回生車, 蓄電装置, 省電力, 上下線一括き電  
(regenerating brake system, regenerating train, energy storage component, energy-saving, feeding two lines in a lump)

## 1. はじめに

近年の電気鉄道車両は、ブレーキ時に主電動機を用いて発電し、回収したエネルギーを同じ路線上の他の列車に供給する回生ブレーキを装備している。このような車両を以下「回生車」と呼ぶ。回生ブレーキは発生する電力を電車線を通じて他の車両等で再利用されるため省電力・省エネ効果がある。

しかし、直流き電の電気鉄道では、変電所で受電した三相交流を直流に変換してき電を行っているが、この整流器には一般的に逆変換機能を持たないため、回生車がブレーキを作用させようとしても、負荷となる、電力を消費して加速している車両(「力行車」)が存在しない場合や、遠方において安全な電圧の範囲で電力を送ることができない場合等には十分な減速力を得ることができず、不足する減速力を摩擦ブレーキに依存することになる。

このような回生負荷の不足への対策のひとつとして、二次電池やフライホイール等の蓄電装置の導入が挙げられる。蓄電装置の導入によって、回生電力を蓄えることができれば、それは後に力行用電力として活用でき、省電力へと繋がる。加えて、き電回路における負荷の平滑化や、路線全体での電

圧変動の平滑化といった効果も期待される。また、回生電力を含む送電損失低減の観点から、上下線一括き電方式も導入されてきている。

本研究は、直流電気鉄道への蓄電装置導入により、回生エネルギーを有効活用する手法を提案し、その効果をシミュレータを用いて定量的に検討することを目的とする。その中でも本稿では、路線に上下線一括き電方式を導入した場合の蓄電装置導入との相乗効果を分析し、評価する。

## 2. 直流電気鉄道の概要

### 2-1. 回生ブレーキの問題点

回生ブレーキによって発生する電力に対して負荷が不足している場合には、十分な減速力を得ることができないため、回生ブレーキ力を減少させて調整することになる。これを回生絞り込みと呼ぶ。回生車と回生負荷は電車線を通じて電力をやり取りしているため、負荷が不足して回生電力の行き場がなくなった場合には電車線の電圧が上昇する。ここで電車線電圧が過度に上昇することは機器保護の観点から好まし

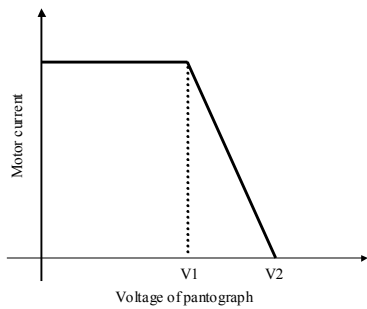


図1 回生絞り込み特性

Fig.1 Characteristics of squeezing control

くないため、回生時には電車線電圧の上昇に伴って主回路電流を減少させ、回生電力を減らす。これを回生絞り込み特性と呼んでいる。

一般的に、電車線電圧の関数としての静的な回生絞り込み特性は図1のようになっている。パンタ点電圧は回生車直近の電車線電圧、主回路電流は回生車の主回路を流れる回生電流である。V1が絞り込みを開始する電圧、V2が車上機器等の耐電圧によって決定される限界電圧である。電車線電圧1500Vのシステムでは、V1、V2がそれぞれ1650V、1800～2000V程度に設定されるのが一般的である。なお、このように限界電圧よりも低い電圧から絞り込みを開始するのは、回生負荷が瞬時に消滅しても動的な電圧の変化が限界を超えないように制御遅れに対する余裕を見込んでいるためである。しかし、現状では必要以上に回生電力を絞り込む傾向が見られることが現車試験等を通じて指摘されている。<sup>[1][2]</sup>また、回生電力がゼロとなり完全に摩擦ブレーキに切り替わることを回生失効と呼ぶ。この切り替えには時間遅れが生じるため、その間だけ列車の総合制動力が不足し、列車の停止までの制動距離が延びてしまう。従って省電力・ブレーキ性能の両者の観点から、回生失効の発生は望ましくない。

回生絞り込み、回生失効をできる限り発生させないようにするためには、パンタ点電圧、あるいは電車線電圧の上昇や急激な変化を防げばよい。蓄電装置の導入により、その効果を見込める。

## 2-2. 路線への蓄電装置の導入

路線への蓄電装置の導入法には大きく分けて車上への導入と地上への導入の2通りがある。蓄電装置を車上へ置くことのメリットは、車両の位置に影響されることなく充放電が可能であることである。一方、装置の質量の制限が大きな問題となっているが、ピークカット的なエネルギー吸収を行えば、小さな容量でも機械磨耗低減の効果が期待でき、コスト面でも実現可能性は高くなっている。蓄電装置を地上へ導入する場合には質量の制約は小さくなるとともに、変電所の機

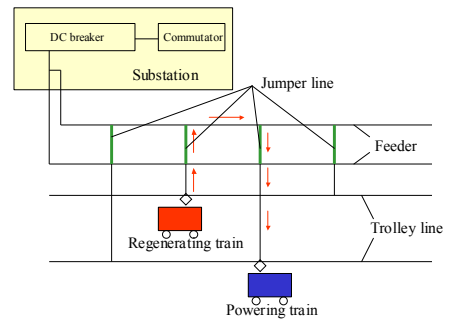


図2 上下線一括き電

Fig.2 Method of feeding two lines in a lump

能を補助する役割を持たせることができる。また、変電所間や路線末端等に設置すれば電車線電圧降下補償にも効果がある。しかし大容量化に伴う性能向上・コストが問題となる。

## 2-3. 上下線一括き電方式

従来は設備の故障などによる停電の影響を最小限にとどめるために、上り線と下り線にはそれぞれ別の回線で電力を供給していたが、このき電方式では、上下線間の回生電流は、変電所を経由して流れるために大きなロスを生じていた。そこで、図2に示すように、上下線のき電線をジャンパ線（接続線）で結び、1回線にした「上下線一括き電方式」とすることで、回生電流は変電所を経由せずに最短で流れるため電力の損失が小さくなり、回生電力の利用効率を向上させることができる。さらに変電所から通常送られる運転用電力も、上下両回線を通じて流すことができるため、電力損失を減少させることができる。

## 3. 直流電気鉄道における路線・車両電力シミュレータ<sup>[3]</sup>

### 3-1. 路線の分割

シミュレーションにあたって、路線は等価的に図3に示すような要素に分割できると考える。

SS:変電所 T:列車

Zn: レール・き電線のインピーダンス

しかし、Znは列車の移動に伴って変化する。取り扱いを簡便にするため図4のように変電所・列車とその隣のインピーダンスを一括して扱うことにして、これらの各モデルの組み合わせで路線を表現する。ただし、順に組み合わせると最後はインピーダンスを持たない要素で終端させる。この要素には必ず列車コンポーネントモデルを用い、変電所で終端としたい場合には、この列車モデルにおける速度・加速度

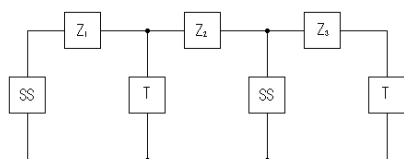


図 3 路線要素

Fig.3 Equivalent circuit of track

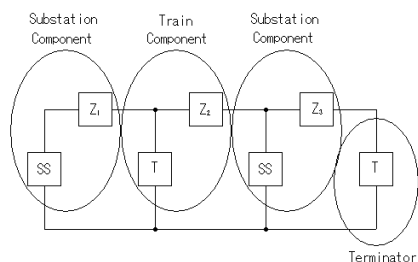


図 4 路線分割

Fig.4 Segmentation of the line

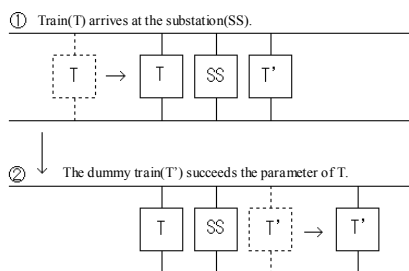


図 5 列車通過時のイメージ

Fig.5 Passage of train

を 0 とすることで実現する。

しかし、この方式でシミュレーションモデルを作成すると、列車と変電所の順序関係が固定されてしまうという問題がある。列車がある 2 つの変電所間を走行している間は 1 つのモデルでシミュレーション可能だが、このままでは列車は変電所を通過させることができない。そこで本シミュレータでは、図 5 に示すように、ダミーとなる列車モデルを変電所の前方に予め用意しておき、本来の列車モデルが変電所に到着した瞬間に、本来のものとダミーが入れ替わるという手法をとっている。つまり、変電所に到着した本来のモデルは到着の瞬間に速度と使用電力が 0 となり、ダミーは瞬時に速度と使用電力を引き継ぎ出発する。この手法によって、電気回路上は 1 つの列車が変電所を超えて移動してゆくのと等価となり、シミュレーション上の制約をなくしている。

ただし、電気回路のシミュレータであるため、速度を交換することの問題は少ないが、初期値の設定に連続性を満たす条件を考慮せぬままに使用電力を交換することは実在しない過渡現象を引き起こす。しかし、マクロに見れば交換地点

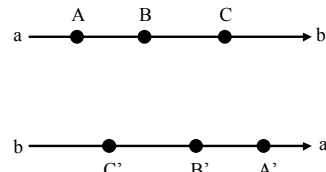


図 6 複線での考え方

Fig.6 Simulation of double track

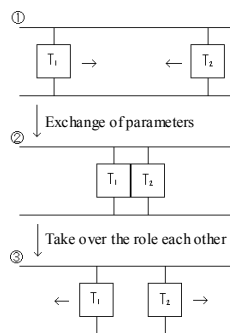


図 7 列車同士の通過時のイメージ

Fig.7 Passing each other of train

での消費電力は一定であり、シミュレーションの目的は路線全体での電力潮流を再現することであるから、列車モデル内での過渡現象に関しては無視してもよいとして取り扱った。

### 3-2. 複線のモデル化

前節で述べたように、路線を要素ごとに分割することによって直流鉄道 1 線分の回路 (つまり単線の場合) は再現できる。しかし、複線の場合は列車とき電回路は上記のような梯子状の回路で再現できるが、実際には変電所は平行する上下線等で共用しているのが一般的である。

そこで、当初のシミュレータに大きな変更を加えずに複線用のシミュレーションを行う手法を以下のように考えた。

図 6 に示すように、a 駅～b 駅間に変電所 A,B,C が順にある場合、

上：途中で変電所 A,B,C を経由する

下：途中で変電所 A', B', C' を経由する

の 2 つに大きく分割する。2 つはそれぞれ単線であるため、前節のモデルの組み合わせで再現できる。しかし、変電所 A と A', B と B', C と C' はそれぞれ同じ変電所であるから、電圧を共通するとともに電流は 2 つの単線分を加算して扱えばよい。この手法によってシミュレータは複線の場合へと拡張することができた。

この手法では計算自体は複線分の回路を解くのと等価であり、計算量は変化しないが、シミュレーションを行うための手順が簡便になり、列車のランカーブを設定する際にも列車の走る方向とデータの符号が一致する、という利点がある。

### 3-3. 上下線一括き電方式のモデル化

シミュレータ上で上下線一括き電モデルを作成するためには、路線上の一定距離ごとにジャンパ線にあたる上下線を接続するコンポーネントモデルを導入すればよい。しかし、3-1節で述べたように、それらのモデルを大量に導入すると、列車がそこを通過する場合に、それに応じただけのダミー列車モデルが必要となってしまいます。そのため、過渡現象のための計算量が大幅に増大してしまい、結果、計算時間が長時間となってしまいます。

そこでモデルの改良を行った。上下線一括き電の場合、上下2線のき電線は抵抗が半分の1線のき電線であると考えて構わない。つまり、複線でも実質単線のように取り扱うことができる。列車が変電所を通過する場合には、今まで通りダミー列車を利用する。上下線の列車同士がすれ違う場合が問題となるが、これもダミー列車の手法と同様に、列車同士がすれ違う瞬間（シミュレータ上ではぶつかる瞬間）に、お互いの速度や消費電力量といったパラメータを交換すればよい。以上の考え方を図7に示す。

### 4. 上下線一括き電方式モデルの確認

従来のき電モデルの妥当性は既に示されている。<sup>[3]</sup>そこで、従来のき電方式モデル・上下線一括き電方式モデルのそれぞれの場合について、以下に示す条件のもと、まずは蓄電装置を導入しない簡単な場合についてシミュレーションを行い、比較することで、3-3節で提案した上下線一括き電モデルが妥当なものであるかどうかの確認を行った。

#### 4-1. 路線条件

路線条件を表1に示す。實在路線をモデルとしているが、全線に渡って駅間距離が短く、全列車が各駅に停車するため、加減速が頻繁であるうえに、日中は列車間隔が10分とやや長く、回生絞り込み・回生失効が頻繁に発生する状況にある。従って、回生ブレーキには厳しい状況、つまり蓄電装置の導入の効果が大きく、稼働率が高くなるであろうため、モデルに選定した。

路線内の変電所と列車の配置を図8に示す。図中の|が変電所を、○が列車をそれぞれ表している。↑は蓄電装置を導入する場合の設置箇所である。

各列車は全線2400秒を間隔600秒で走行するので、4列車が在線することになる。ただし、上下線それぞれの始発駅では列車は同時には発車せず、この時間差を生み出すための停車時間も含めて全線2400秒となっている。また、運転は實在のランカーブによってシミュレーションを

表1 路線条件

Table.1 Track condition

Length of track	26500[m]
Number of substations	5
Position of substations	1700[m],7400[m],16300[m],19800[m],23900[m]
Position of energy storage components	4550[m],9600[m],14100[m],17550[m],21850[m]
Headway of trains	600[s]
Total operating time	2400[s]

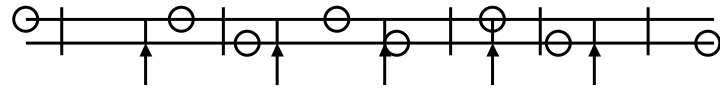


図8 路線内の配置

Fig.8 Equipments of line

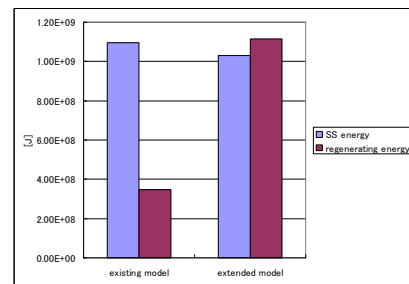


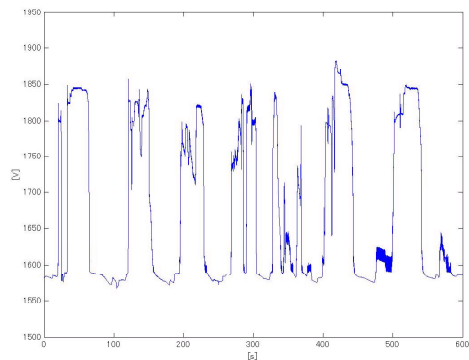
図9 各ケースの変電所出力電力量と回生電力量  
Fig.9 Energy from substations and regenerating energy

行った。なお、回生絞り込みについては、図1のV1,V2をそれぞれ1800V,1850Vとしてある。

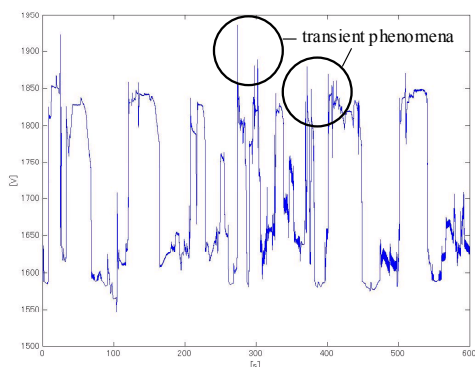
#### 4-3. シミュレーション結果

従来き電方式モデル・上下線一括き電方式モデルのそれぞれの場合について、得られた変電所出力電力量・回生電力量を図9に示す。なお、この場合の回生電力量はモデル内の各列車コンポーネントがブレーキ時に回生（出力）する電力量の総和で求めた。上下線一括き電モデルでは従来モデルと比較して、回生電力量が3倍程度となっており、それに伴い変電所出力電力量は6%程度削減されていることがわかる。実際のエネルギー削減量は2~3%程度であると試算されており、上下線一括き電方式を導入した本モデルによって妥当な結果を得られた。

各ケースの電圧変動の例として路線中央の変電所（16300m地点）での電圧変動の様子を図10に示す。従来モデルの(a)の場合に比べて、上下線一括き電モデルの(b)では電圧変動が小さくなっている。これは上下線一括き電化することによって、負荷が平滑化されたことの影響だと考えられる。また、3-3節で述べた列車間の通過によって生じる過渡現象も見てとれる。



(a) existing model



(b) extended model

図 10 各ケースの電圧変動

Fig.10 Voltage movement at substation

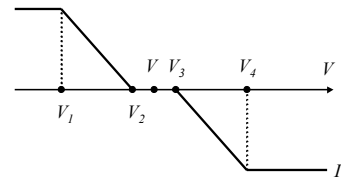


図 10 蓄電装置の制御動作

Fig.10 V-I characteristic of energy storage devices

表 2 蓄電装置の制御変数

Table.2 parameter of Energy Storage Components

$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
$V_s-50$	$V_s-10$	$V_s+100$	$V_s+500$

$V_s=1590[V]$ :Output voltage from substations

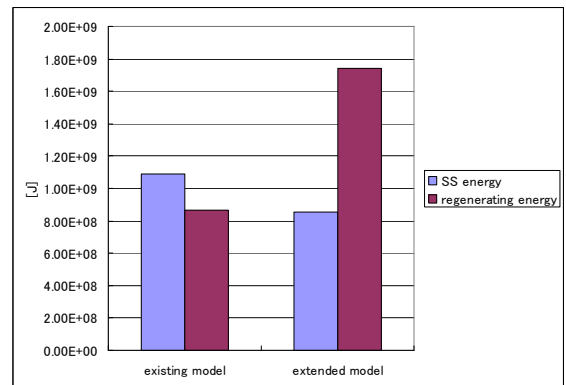


図 11 各ケースの変電所出力電力量と回生電力量

Fig.11 Energy from substations and regenerating energy

## 5. 蓄電装置導入ケース

路線に上下線一括き電方式を導入した場合の蓄電装置導入との相乗効果について調べるため、4章と同様に従来モデル・上下線一括き電モデルのそれぞれについて、蓄電装置導入路線についてシミュレーションを行った。路線条件は先ほどと同じ、表 1 の通りである。

### 5-1. 蓄電装置の制御

本研究では蓄電装置は内部の構成や材料・素子等の制約を考えず、理想化して扱う。具体的には、設置箇所の電車線電圧を監視して吸収・供給する電流を以下のように制御する理想的な電流源と考えた。

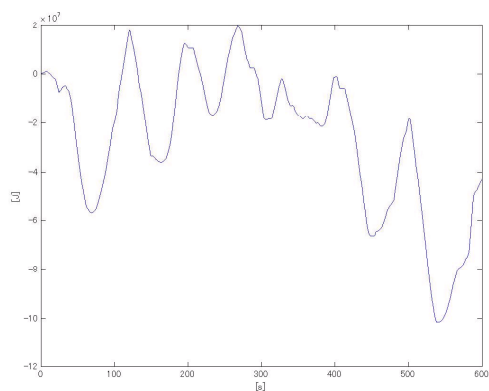
- 電車線電圧上昇時
  - 回生負荷の不足と判断して電力を吸収
- 電車線電圧降下時
  - 力行車増加による電圧降下と判断して電力を供給

その制御動作を簡単に示したものが図 10 である。今回は  $V_1 \sim V_4$  の値を表 2 に示すような固定値とした簡単な制御を採った。なお、電流の上限は一列車分の回生電力吸収に十分と考えられる  $2000[A]$  とし、 $600$  秒のシミュレーションであることから、充放電効率や蓄電量に関する制約は設けなかった。

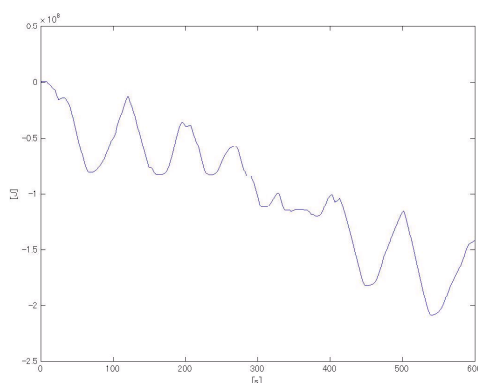
### 5-2. シミュレーション結果

各ケースの変電所出力電力量、及び回生電力量を図 11 に示す。従来モデルと比較して、上下線一括き電モデルは回生電力量が倍程度に増加しており、それに伴って変電所出力電力量は  $20\%$  程度削減されている。

図 9 と比較しても、上下線一括き電モデルに蓄電装置を組み合わせることによって、大幅な回生率向上、変電所出力電力量の削減がなされたことがわかる。



(a) existing model



(b) extended model

図 12 各ケースの蓄電量変化

Fig.12 Energy of storage devices

### 5-3. 蓄電装置の動作

各ケースにおける路線内の全ての蓄電装置の蓄電量を合計した総蓄電量の変化を図 12 に示す。放電・充電がそれぞれ正・負である。従来モデルの結果の(a)では  $2 \times 10^7 \sim -1 \times 10^8 [J]$  の範囲で動作しているのに対して、上下線一括電モデルでは動作が放電側に寄っており(つまり充電傾向にあり)、最大で  $-2 \times 10^8 [J]$  程度放電している。従って今回は表 2 のように  $V3, V4$  をそれぞれ大きく設定し、充電しにくい条件であるにも関わらず、動作が充電側に寄る結果となったことになる。

蓄電装置 1 基あたりでは  $\pm 5 \times 10^7 [J]$  (およそ  $14 [kWh]$ ) の範囲で動作することとなる。この条件を満たす蓄電装置を電気二重層キャパシタを用いて考えると、その質量はおよそ  $400 \sim 500 \text{kg}$  となる。<sup>[4]</sup>非現実的な値ではないが、技術革新による蓄電装置の高出力密度化・高エネルギー密度化、及び制御改善が求められる。今回のシミュレーションでは蓄電装置について単純な制御しか用いていないため、大幅な改善の余地があると考えられる。

## 6. まとめ

直流電気鉄道システム内に蓄電装置を導入することにより、回生ブレーキの有効活用とそれに伴う省電力・省エネルギー効果、き電回路における負荷の平滑化や路線全体での電圧変動の平滑化に伴う機器保守性能向上といったメリットがある。本稿では、その省電力効果の評価に重点をおき、特に上下線一括電方式と組み合わせることでの相乗効果について検討を行った。

計算機の制約上、上下線一括電方式を模擬したシミュレーションモデルを作り、そのモデルによって実用的な結果が得られることを示した。

シミュレーションモデル内に蓄電装置・上下線一括電方式を導入し、それぞれ単独での導入よりもよい省電力効果が生ずるというシミュレーション結果を得た。

蓄電装置の制御には大幅な改善余地があり、今後の研究における重要項目である。

## 参考文献

[1] 岡田万基・古関隆章：「直流通電システムにおける回生ブレーキ最大活用時のエネルギー評価」東京大学卒業論文(2002)

[2] 小笠正道：「営業電車の回生ブレーキ動作状況調査」第 160 回鉄道総研月例発表会要旨 160-7(2003)

[3] 西川勝也・古関隆章：「直流電気鉄道における各種電力吸収設備による回生ブレーキ機能向上の評価」東京大学卒業論文(2004)

[4] Junichi KOUYAMA, Tsukasa SATO, Satoru SONE and Susumu TAKANO : 「A Study of Energy Storage Devices for Railway Power System -About Effectiveness of Wayside-」 IEEJ National Convention Vol. 5, p.300 (2005)

神山純一・佐藤司・曾根悟・高野奏：「直流電気鉄道へのエネルギー蓄積素子導入の検討 -地上側における導入の有効性について-」平成 17 年電気学会全国大会 5-206 p.5-300 (2005)