

回生車時代の直流き電鉄道における地上蓄電装置を用いた 省エネルギー効果の評価

野口 勝義* 岡田 万基 古関 隆章 (東京大学)

Evaluation of Energy-Saving Effects of Regenerative Trains in DC-Electrification System by Introducing Energy Storage Components

Katsuyoshi Noguchi*, Yuruki Okada, Takafumi Koseki, (The University of Tokyo)

The regenerative brake is mounted on the Electric Railways vehicles recently. In this research, we propose and examine the introduction of energy storage devices in DC-electrification system for effective use of regenerative brakes and energy saving. And we evaluate energy-saving effect of introduction of energy storage devices by real existence line model simulation.

キーワード：回生ブレーキ，上下線一括き電，蓄電装置，省エネルギー

(Regenerative brake, Feeder-connected method, Energy storage device, Energy-saving)

1. 序論

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「回生車」と呼ぶ。回生車であっても摩擦力による機械ブレーキと、先に述べた電磁力を利用する電気ブレーキ（回生ブレーキ）が併用されている。

電気車の摩擦ブレーキは空気ブレーキとも呼ばれ、その名の通り、空気圧によって制御されている。従って、応答速度が非常に遅い。ブレーキ力は摩擦力であるから、摩擦係数という非常に環境に左右されやすい変動要素を含んでいる。具体的には応答時間が1秒程度、摩擦係数の変動幅は数十%にもなる。さらに、摩擦ブレーキ系は保守に非常に手間がかかる上に、上述の摩擦の変動要素が原因で乗り心地を悪化させたり、滑走を誘発するという問題もある。それに対して、回生ブレーキは制御が電気によるものなので応答が非常に早く、ブレーキシューのように直接接触する部分がないため車両の保守を軽減できる。さらに、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・省エネルギー効果がある。

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、遠方にあつ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、電気二重層キャパシタ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。

本研究では、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、その効果を変電所出力電力量や回生率から定量的に検討することを目的とする。

2. 回生ブレーキの課題

〈2.1〉 回生絞り込み制御

回生ブレーキは、回生負荷に電力を供給することによってブレーキ力を得ているため、負荷が不足して回生電力の行き場がなくなった場合は架線電圧が上昇する。架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くないため、回生車は回生時に架線電圧の上昇に伴って電動機電流を減少させ、回生電力を絞り込むようにしている。

〈2.2〉 回生ブレーキの課題

回生絞り込み特性が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⁽¹⁾⁽²⁾。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。よって、回生失効が起らず、回生ブレーキが確実に動作するための対策が必要となる。

〈2.3〉 回生ブレーキ性能向上策

回生失効・回生絞り込みをできるだけ抑え、回生ブレーキの性能向上を図る主な施策を以下にまとめる。

(1) 回生失効対策設備

常用ブレーキとして電気ブレーキのみを用いる場合、ブレーキを確実に動作させるために回生負荷対策は不可欠である。電力吸収設備としては、抵抗器・蓄電装置・回生変電所等が挙げられる。

(2) き電系対策

電気ブレーキの負担割合が増えると、変電所から列車へ供給されるエネルギーは減少し、列車間でのやりとりが増加する。電気ブレーキは架線電圧に依存してその特性が変わるので、架線電圧をあまり大きく変動させないことが望ましい。よって、き電電圧を下げたり、き電抵抗を低減するなど、回生車の存在を前提としたき電設備に変えていく必要がある。

(3) 車両性能向上

現在の常用最大ブレーキ特性と電気ブレーキの特性を比較すると、高速域における電気ブレーキ性能の向上が必要となる。

3. 直流き電システムのモデル化

〈3.1〉 路線の分割

シミュレーションにあたって、路線での電力収受を考慮するために、直流き電システムを等価回路で表現する必要がある。まず、路線は図1のような要素に分割できる。ただし、 Z_n の値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2に示すように、変電所・列車とその隣にあるインピーダンスを一括して扱うこととし、最後はインピーダンスを持たないコンポーネントで終端とする。これらの各コンポーネントモデルの組み合わせで路線を表現する。

〈3.2〉 コンポーネントの接続

図3に示す通り、各コンポーネントは隣り合うコンポーネントからの出力電流・出力電圧を入力として、それぞれ

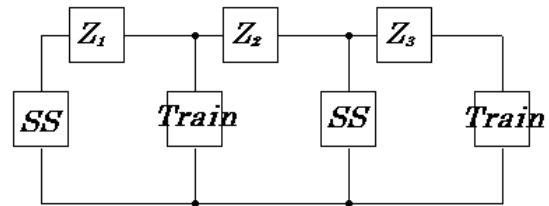


図1 路線の等価回路

Fig.1 Equivalent circuit schematic of track

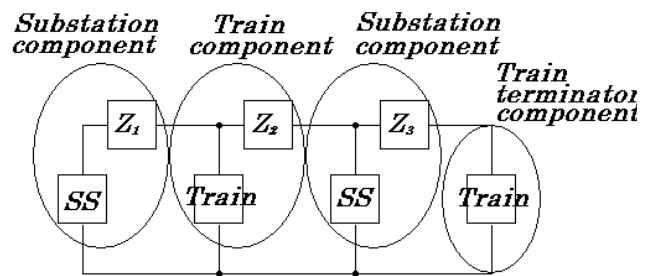


図2 路線の分割

Fig.2 Track splitting

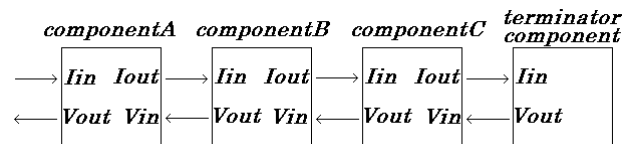


図3 各コンポーネントの接続

Fig.3 Connection of each component

に対して電圧・電流を出力するよう接続する。ただし、終端コンポーネントだけは入力電流に対して電圧を出力するものとする。

4. 単線でのシミュレーション

〈4.1〉 路線条件

実在路線として表1のような路線を用いる。これは新京成電鉄線松戸～京成津田沼間をモデルとしており、列車の運転曲線は実測データを元としている。変電所位置は松戸から見た位置である。

新京成電鉄線は全線に渡って駅間距離が短く、また全列車が各駅に停車するためブレーキ頻度が高く、回生ブレーキにとっては悪条件となっている。そのため、蓄電装置導入による回生ブレーキ性能向上、および省エネルギー効果が期待できる。

表1 路線条件

Table 1. Track condition

路線長	26500[m]
変電所個数	5[個]
変電所位置	1700[m],7400[m],16300[m],19800[m],23900[m]
全路線運転時間	2430[s]

〈4・2〉 時間帯の影響

まず最初に列車運行時間帯によって回生ブレーキ性能にどれだけの差異が出てくるのかを調べるため、新京成線単線モデルを用いてシミュレーションを行った。

設定したケースは表2に示す3ケースで、ケース1が朝ラッシュ時間帯を想定した列車間隔4分の場合、ケース2がラッシュ時間帯と閑散時間帯の間である中間時間帯を想定した列車間隔8分の場合、最後にケース3が閑散時間帯を想定した列車間隔10分の場合である。列車間隔以外の条件は全て等しい。

各ケースにおける回生率を表3に示す。ここでの回生率は全列車力行時消費エネルギーに対する列車が回生したエネルギーの割合である。

$$\text{回生率 [\%]} = \text{回生電力量 [J]} / \text{列車消費電力量 [J]}$$

表3から、ケース1とケース3で回生率が10%以上も差があることがわかる。

また、図4に各ケースにおける松戸発の列車のパンタ点電圧変動(0~240[s])を示す。ラッシュ時間帯のケース1では電圧変動が比較的小さく、閑散時間帯のケース3では電圧変動が大きくなっていることが分かる。

以上の結果から、ケース3が回生ブレーキが働きにくい状況であることがわかる。

〈4・2〉 蓄電装置の導入

(1) 蓄電装置の動作

路線へ蓄電装置を導入してシミュレーションを行う。導入する蓄電装置の基本動作は以下の通りである。

表2 ケース設定

ケース	列車運転間隔	
ケース1	4分	ラッシュ時間帯を想定
ケース2	8分	中間時間帯を想定
ケース3	10分	閑散時間帯を想定

表3 各ケースの回生率

Table 3. Regenerative rate of each case

	ケース1	ケース2	ケース3
回生率	37.9%	32.3%	25.7%

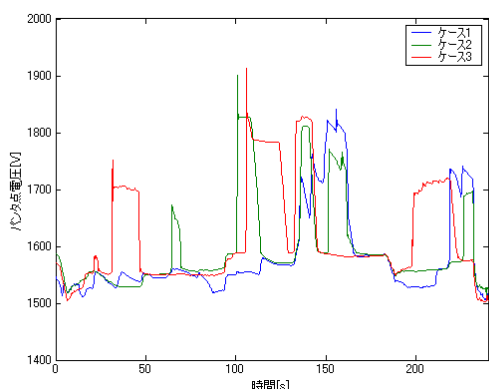


図4 各ケースの列車電圧変動

Fig.4 Voltage fluctuation of each case

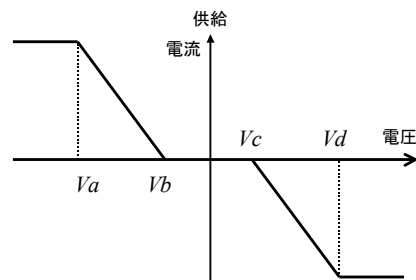


図5 蓄電装置の動作特性

Fig.5 Energy storage device characteristic

- ・架線電圧上昇時：
回生負荷（力行車）の不足と判断して電力吸収
 - ・架線電圧降下時：
力行車増加による電圧降下と判断して電力供給
- 架線電圧と入出力電流の関係を図5に示す。

V_b, V_c がそれぞれ電力供給開始電圧，電力吸収開始電圧である。入出力電流の上限は4000[A]とし、それぞれ上限になる電圧を V_a, V_d とおいた。

(2) 蓄電装置の導入（一箇所）

実際にモデルに蓄電装置を導入する。最初に路線内に蓄電装置をひとつ導入する場合を考える。導入箇所は上本郷変電所と五香変電所のちょうど中間にあたる4550[m]地点とした。

導入する蓄電装置の動作は表4に示す4タイプである。 V_b が電力供給開始電圧， V_c が電力吸収開始電圧である。なお、電力供給／吸収上限電圧 V_a, V_d はいずれの場合も1250[V],2000[V]とした。

表4 蓄電装置の動作設定

Table 4. Type of energy storage device

$V_b \setminus V_c$	1670[V]	1800[V]
1500[V]	タイプ1	タイプ2
1550[V]	タイプ3	タイプ4

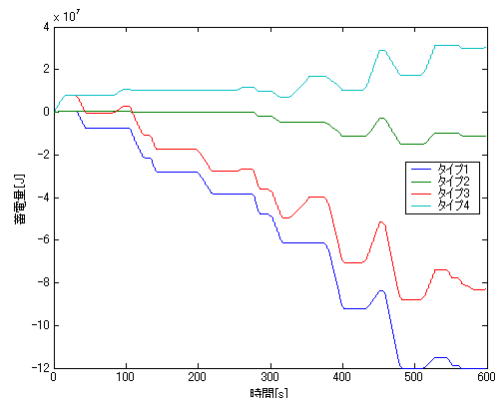


図6 各タイプの蓄電装置の蓄電量の推移

Fig.6 Change in amount of charge

タイプ 1,3 は架線電圧が列車の絞り込み開始電圧である 1670[V]で電力吸収を開始するように設定した。それに対してタイプ 2,4 では架線電圧が列車の絞り込み開始電圧を超えてからも列車同士での電力融通を見込み、電力吸収開始電圧を高めめの 1800[V]に設定した。同様に供給開始電圧も変電所無負荷送り出し電圧の 1590[V]を基準に、タイプ 1,2 では低めの 1500[V]、タイプ 3,4 ではやや低めの 1550[V]の 2 通りを設定した。

各タイプの蓄電装置の動作は図 6 のようになった。タイプ 2,4 の蓄電装置はほとんど電力吸収せず、電力供給ばかりの動作になっている。逆にタイプ 1,3 は吸収に偏った動作になっており、特にタイプ 1 は 500[s]前後で蓄電制限まで電力吸収している。

蓄電装置は回生電力を吸収しつつも蓄電量にできるだけ余裕がある動作が望ましい。従って、蓄電装置の動作に蓄電量の制約も加えることとする。具体的には、

表 5 蓄電装置の改良動作設定

Table 5. New type of energy storage device

$V_c \setminus V_b$	1670+k[V]	1800+k[V]
1500+k[V]	タイプ5	タイプ6
1550+k[V]	タイプ7	タイプ8
1590+k[V]	タイプ9	
備考	k=1.5E-06	k=4.2E-07

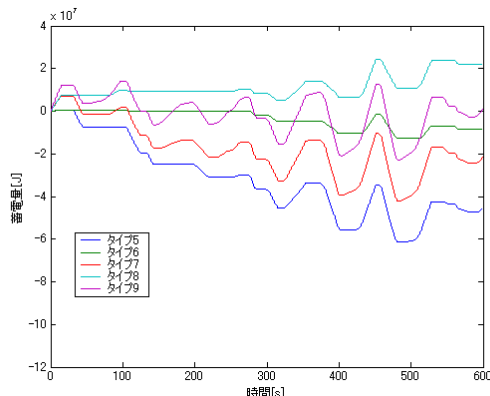


図 7 新タイプの蓄電装置の蓄電量の推移

Fig.7 New change in amount of charge

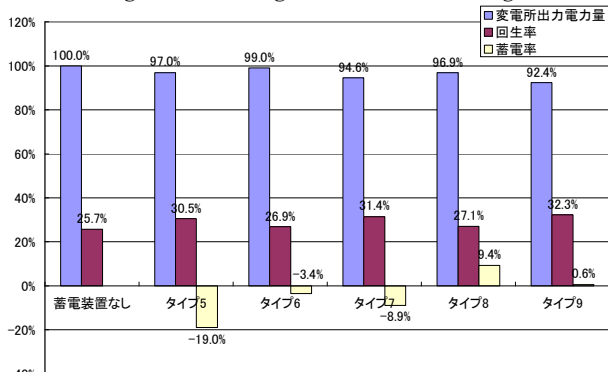


図 8 各ケースの変電所出力電力量と回生率

Fig.8 Output energy from substations and regenerative rate of each case

$$Vx(E) = Vx + kE \quad \dots(1)$$

となるような制御定数 k を設定する。

(V_x はそれぞれ V_a, V_b, V_c, V_d , E は蓄電量の初期値との差)

回生電力吸収動作を改善したいため、蓄電量が最大となったときに電力吸収開始電圧 V_c が架線上限電圧 1850[V]になるように設定すると、 V_c が 1670[V]の場合は $k=-1.5 \times 10^{-6}$, V_c が 1800[V]の場合は $k=4.2 \times 10^{-7}$ となる。以上の変更を加えてタイプ 1~4 からタイプ 5~8 を設定し、さらに、タイプ 3 から V_c 初期値を変電所無負荷送り出し電圧 1590[V]まで上げて設定したタイプ 9 も加えた。まとめると表 5 のようになる。

タイプ 5~9 の蓄電装置を導入した路線のシミュレーションを行った蓄電量推移結果を図 7 に示す。図 6 と比較して全ての蓄電装置の動作が改善していることがわかる。

また、図 8 に各ケースの変電所出力電力量と回生率の結果を示す。変電所出力電力量は蓄電装置なしの場合の 1.83×10^9 [J]を 100%として表示している。蓄電装置の導入によって回生率は 1.2~6.6%程度増加し、変電所出力電力量は 1.0~7.6%程度減少している。

タイプ 9 は変電所出力電力量、回生率、蓄電装置の動作のいずれにおいても他のタイプよりよい結果を得た。従って今回のケースへの蓄電装置導入に最も適しているのはタイプ 9 であることが分かった。

各列車の最大電圧・平均電圧を図 9 に示す。図 9 より、蓄電装置から離れるほど架線電圧は上昇していることがわかる。列車 1,2 が蓄電装置周辺の列車、列車 3,4,5 が蓄電装置遠方の列車である。蓄電装置からの距離と電圧上昇の関係ははっきり見て取れる。

従って、最も結果がよかったタイプ 9 の蓄電装置を導入する場合においても、蓄電装置から遠方の列車の回生ブレーキ改善には繋がっていないことがわかる。このため、路線内にはいくつかの蓄電装置を導入する必要がある

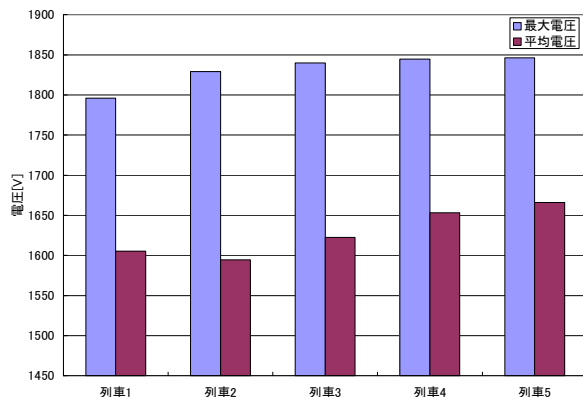


図 9 各列車の最大電圧と平均電圧

Fig.9 Max voltage and average voltage of each trains

表6 蓄電装置導入箇所設定

Table 6. Introduction place of energy storage devices

ケース1	変電所直下に導入
蓄電装置個数	5[個]
蓄電装置位置	1700[m],7400[m],16300[m],19800[m],23900[m]
ケース2	変電所間に導入
蓄電装置個数	5[個]
蓄電装置位置	4550[m],10367[m],13334[m],18050[m],21850[m]

表7 シミュレーションケース

Table 7. Simulation case

		蓄電装置のタイプ			
		タイプ7	タイプ8	タイプ9	
導入箇所	ケース1	ケース1A	ケース1B	ケース1C	
	ケース2	ケース2A	ケース2B	ケース2C	

(3) 蓄電装置の導入 (複数箇所)

路線内に複数の蓄電装置を導入する。導入箇所は大きく分けて変電所直下と各変電所間の2通りが考えられる。蓄電装置を変電所直下に導入する場合は設置スペースの制約が少なく、変電所補助の役割が主となることが考えられる。それに対して蓄電装置を変電所間に導入する場合は、変電所補助と架線電圧降下補償の役割が考えられる。

そこで、路線内の5つの変電所直下へそれぞれ蓄電装置を導入するケース1と、同じ数の蓄電装置を変電所間に導入するケース2を設定する。ケース2では変電所間隔が最も大きい五香変電所～二和変電所間には区間を3分割するように蓄電装置を2つ、それ以外の変電所間は中間地点に蓄電装置を導入する。以上を表6に示す。

導入する蓄電装置のタイプは前節で結果のよかったタイプ7～9とした。従ってシミュレーションに用いるケースは表7に示す6ケースである。

各ケースの変電所出力電力量と回生率の結果を図10に示す。変電所出力電力量は蓄電装置なしの場合の1.83×10⁹[J]を100%として表示している。

蓄電装置の導入によって、回生率は3.6～16.3%程度増加し、それに伴い変電所出力電力量は7.4～23.5%程度減少している。最もよい結果となったのはケース1、ケース2ともにタイプ9の蓄電装置を導入した場合、つまりケース1Cとケース2Cである。それぞれ回生率は43.3%,42.0%となっている。変電所出力電力量も2割以上削減できることができたということがわかった。

最後に蓄電装置の電圧降下補償効果について考察する。図11、図12はそれぞれケース1Cとケース2Cの各列車の電圧変動である。いずれの場合もピーク電圧は1750～1800[V]の間に抑えられていることが分かる。

図11より、蓄電装置を変電所直下に導入しているケース1Cの場合は、度々1400[V]程度まで架線電圧が降下していることがわかる。これは列車が変電所から離れた地点で周りに回生車もない状態で力行しようとするために架線電圧が低下するものである。

それに対して図12では、1450[V]を下回るような電圧効果はほとんどなく、ある程度高い電圧を維持していることが分かる。これは蓄電装置が変電所間に置かれているため、

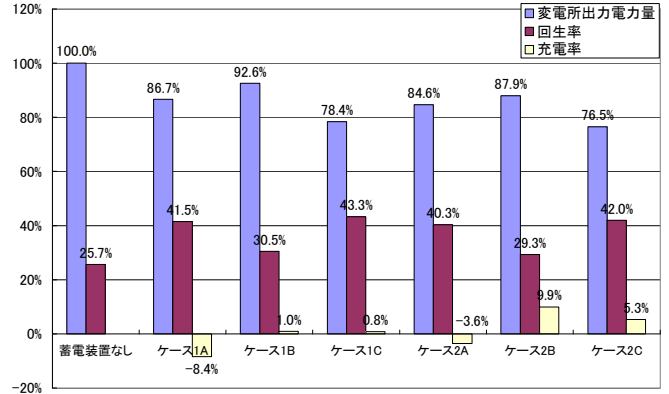


図10 蓄電装置を路線内に5個導入した場合の結果
Fig.10 Output energy from substations and regenerative rate of each five energy storage devices introduced cases

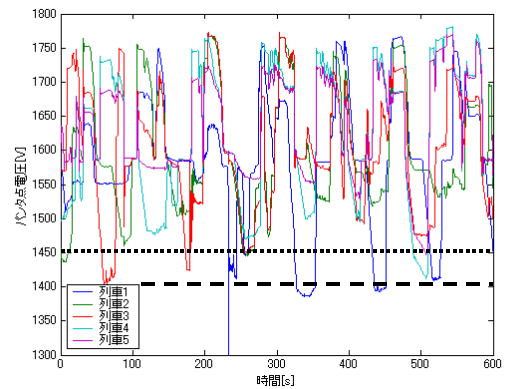


図11 ケース1Cの各列車の電圧変動

Fig.11 Voltage fluctuation of each train in case 1C

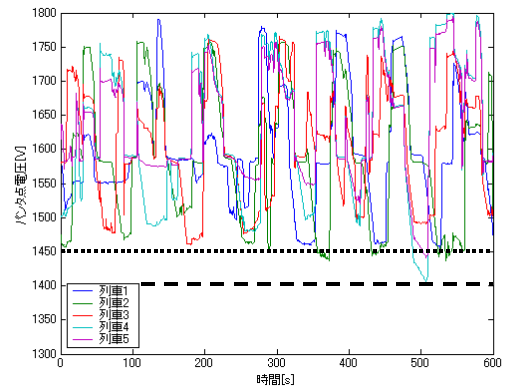


図12 ケース2Cの各列車の電圧変動

Fig.12 Voltage fluctuation of each train in case 2C

変電所から離れた地点で力行する列車に対しても蓄電装置が即座に電力供給を行えるためである。

以上より、蓄電装置を変電所間に導入することで架線電圧降下補償効果があるということが得られた。

5. 複線でのシミュレーション

〈5・1〉 複線への拡張

本研究では複線のモデルとして上下線一括き電モデルを取り上げる。従来の直流電気鉄道では、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。しかし、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損失を生じていた。そこで、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。

〈5.2〉 列車タイミングの影響

回生ブレーキは回生負荷に電力を供給することでブレーキ力を得るため、その性能は回生負荷の状態に大きく作用される。回生ブレーキ性能に影響を与える主な要因は「1. 他列車の電力の状態」「2. 他列車との位置関係」「3. 変電所との位置関係」の3つである。3については単線でも複線でも影響は変わらない。しかし、複線では上下線に列車が存在するため、1と2の要因は単線以上に大きく回生ブレーキ性能に影響してくると考えられる。

そこで本節では、上下線の出発タイミングを変化させることで、異なる列車同士の位置関係・他列車の電力状態を作り、その影響について考察を行う。

モデル路線は4章と同じく新京成電鉄線松戸～京成津田沼間、路線条件は表7の通りとし、上下線の列車出発タイミングを「同時出発」、「上り線±1分遅れ」、「上り線±2分遅れ」、「上り線±3分遅れ」と変化させた、計7パターンでの計算を行った。

結果を図13に示す。変電所出力電力量は上下線同時出発の場合の 3.40×10^9 [J]を100%とした。また、送電損失率は変電所出力電力量と回生電力量の和に対する列車消費電力量の差分の割合を表しており、送電損失の他に列車の捕機消費電力量や電力変換損失が含まれる。

上下線同時出発の場合を基準として、各ケースで回生率は+7.6～-1.8%程度の増減があり、変電所出力電力量も+4.1～-9.9%程度の大きな増減がある。従って、上で述べた2, 3の要因はやはり回生ブレーキ性能、及び省エネルギー効果にとって非常に大きな影響を与える要因であるということが分かった。

〈5.2〉 蓄電装置の導入

複線モデルに対して蓄電装置を導入する。路線条件は前節と同じまま、蓄電装置導入ケースについては表7の6ケースで計算を行った。図14に結果を示す。変電所出力電力量は前節の蓄電装置なしの場合の 3.40×10^9 [J]を100%とした

蓄電装置の導入によって、回生率は2.1～11.4%程度増加し、それに伴って変電所出力電力量は8.1～15.0%程度減少している。複線の場合でもケース1C, ケース2Cの結果がよいことから、これまでの結果を踏まえて、き電システム内への蓄電装置に関して、それらのケースに用いたタイプ9の蓄電装置制御が最も適していると言える。即ち、電力吸

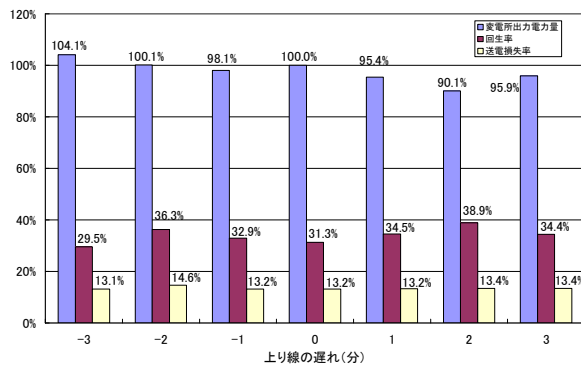


図13 列車タイミングの変化に対する影響

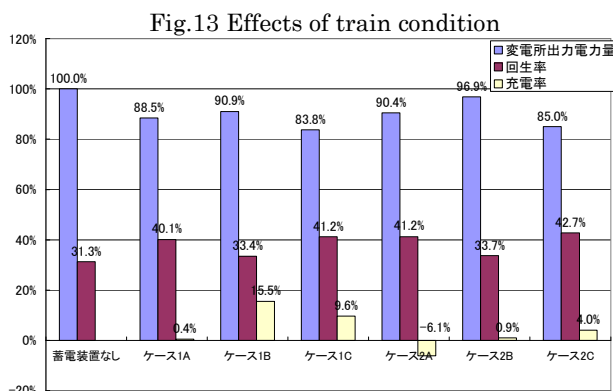


図14 各ケースの変電所出力電力量と回生率

Fig.14 Output energy from substations and regenerative rate of each case

収開始電圧は低めに、電力供給開始電圧は高めに設定し、蓄電装置が動作しやすい条件を用いた方がよいということである。

6. 結論

本研究における知見を以下にまとめる。

1. 蓄電装置を架線電圧と蓄電量を制約条件として動作させることで、余裕を持った無駄のない動作が実現した。
2. 直流き電鉄道路線内において変電所間に蓄電装置を導入することにより、架線電圧降下補償効果があることが示された。
3. 直流き電鉄道複線では、列車の力行／制動タイミングの違いによって回生ブレーキ性能に与える影響が大きくなることが分かった
4. 直流き電鉄道複線へ蓄電装置を複数導入することにより、回生率は最大 11.4%程度改善され、変電所出力電力量は 16.2%程度削減できた。

文 献

- (1) 岡田万基:「直流き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