

地上用電力貯蔵装置の適用効果向上を 目指した制御手法

小西 武史* 吉井 剣* 重枝 秀紀*
高橋 慎** 平松 正宣**

Improvement of Control Method for Fixed Energy Storage System

Takeshi KONISHI Tsurugi YOSHII Hidenori SHIGEEDA
Shin TAKAHASHI Masanobu HIRAMATSU

Some types of fixed energy storage systems have been applicable to DC electrified railways. However, these systems have a limited capacity in general. If the charge status of the storage media is inappropriate, the charge/discharge process can no longer be continued depending on the driving status: powering or regenerating of electric rolling stock. We therefore have developed a new control method, by which sufficient and constant power supply to meet the energy need of electric rolling stock is ensured, while the storage media is kept in the middle state of charge in preparation for the next phase of powering or regenerating. A prototype storage system applying the developed control method and electric double layer capacitors (EDLCs) as storage media was built. Tests were performed using a railway test line, electric rolling stock, and the system. It was confirmed that the developed energy storage system could charge or discharge according to powering/regenerating of complicated load.

キーワード：電力貯蔵，電気二重層キャパシタ，固定電圧制御，補充電・補放電制御

1. はじめに

公共輸送機関としての鉄道の重要性は，地球環境保全意識の高まりとともに，近年ますます増していることから，安定した電力供給の確保，節電に対する取り組みが一層求められる。電気鉄道への地上用電力貯蔵装置の適用は，その解決手段の一つとして，今後より注目されるものと予想される¹⁾。これまでに，フライホイールやリチウムイオン電池，ニッケル水素電池，電気二重層キャパシタ²⁾ (Electric Double-Layer Capacitor: 以下 EDLC と略す) が地上用電力貯蔵装置の電力貯蔵媒体として実用化されている^{3)~6)}。

電力貯蔵装置の適用によって，電車制動時に架線に返されたエネルギーを吸収することで回生失効に陥るのを回避できる (回生失効回避効果)。また，電力貯蔵装置が電力回生エネルギーを活用することで電車線とレール間の電圧 (以下，外線電圧と呼ぶ) の上昇を抑制し，逆に放電することで外線電圧の降下を補償することが可能になる (電圧補償効果)。さらに，変電所が供給する電力変動を抑制することでピーク電力の削減効果を得るこ

とができる (負荷変動抑制効果)。

また，電力貯蔵装置の適用効果として，電力回生エネルギーの有効利用による省エネルギー化が期待されている⁷⁾。しかしながら，従来の電力貯蔵装置の制御手法では，充放電のタイミングに関わる制御パラメータを調整しても，必ずしも省エネルギー対策とはならず⁷⁾，新たな工夫が必要とされる。そこで本稿では，適用効果を向上するための電力貯蔵装置の制御手法の概要と，従来の制御手法と比較した結果について紹介する。

2. 電力貯蔵装置の制御手法

2.1 従来の制御手法

電車が加速力行すると，変電所から電車に向かって電流が供給されるため，電車線の抵抗分によって電圧降下が発生し，外線電圧は低下する。一方，電車が回生すると，他の電車へ電流を供給するために，変電所の送り出し電圧よりも外線電圧は高くなる。従って，基本的には，外線電圧が高くなると回生電力が，外線電圧が低くなると力行電力が生じていると判断できる。電力貯蔵装置の制御としては，これを利用して図1に示す手法 (固定電圧制御) が従来から適用されてきた。電力貯蔵装置は外

* 電力技術研究部 き電研究室

** 株式会社明電舎

特集：電力技術

線電圧を検出して充放電動作を判断する。外線電圧が「充電開始電圧」を上回ると、電力貯蔵装置の近傍において回生電力が発生したと判断して充電動作を行う。逆に、外線電圧が「放電開始電圧」を下回ると、電力貯蔵装置の近傍において力行電力が発生したと判断して放電動作を行う。

電圧降下補償を目的とする場合、電力貯蔵媒体の充電状態を充放電範囲の上限に近い値に保持する必要がある。一方、回生電力吸収を目的とする場合、電力貯蔵媒体の充電状態を充放電範囲の下限に近い値に保持する必要がある。

電力貯蔵装置を適用することで省エネルギー効果を得る、あるいは電圧降下補償と回生電力吸収の両方の効果を得るためには、充電する電力回生エネルギーと放電する力行エネルギーのバランスを取る必要がある。しかしながら、固定電圧制御手法では、充放電を繰り返すうちに充電状態が上限あるいは下限に向かって偏る傾向がある(図2)。従って、充電ならびに放電開始電圧を固定した制御手法では、省エネルギー効果を得ることが難しくなる。

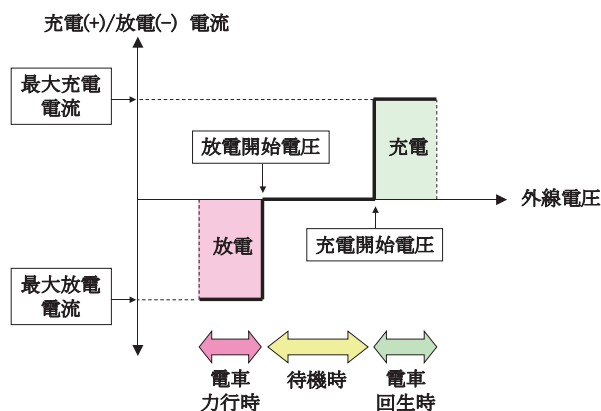


図1 固定電圧制御手法の概念

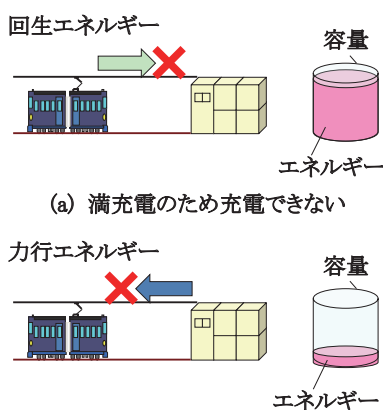


図2 固定電圧制御手法の問題点

2.2 充電状態を考慮した制御手法

前節の問題点に対処するためには、電力貯蔵装置は、

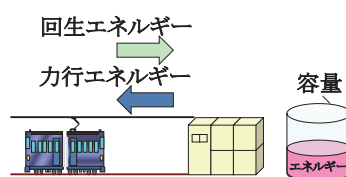


図3 充電状態を考慮した制御手法

図3に示すように、充電状態が上限または下限の付近に偏ることなく、常に外線側との電力のやりとりを行える適正な状態に制御する必要がある。そこで、以下のような制御手法を提案した。

2.2.1 可変電圧制御手法

電力貯蔵媒体の充電状態に応じて、充電開始電圧ならびに放電開始電圧を変化させることにより、充電状態を中間付近に安定させることができれば、常に充電、放電の対応が可能になる。そこで、図4に示すような「可変電圧制御手法」を提案した。

図4に可変電圧制御手法の概略を示すとともに、具体的方法を以下に示す。

- (1) 充電状態が中間にある場合は、通常の充放電開始電圧とする。
- (2) 充電状態が上限に近い場合は、積極的に放電を行うことにより、充電状態を中間付近に戻すように制御する。すなわち、充電開始電圧と放電開始電圧を一時的にともに上げ、充電の機会を少なくし放電の機会を多くする。
- (3) 充電状態が下限に近い場合は、積極的に充電を行うことにより、充電状態を中間付近に戻すように制御する。すなわち、充電開始電圧と放電開始電圧を一時的にともに下げ、充電の機会を多くし放電の機会を少なくする。

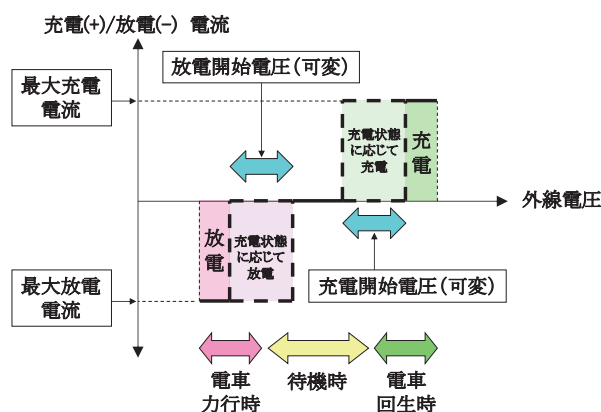


図4 可変電圧制御手法の概念

2.2.2 補充電・補放電制御手法

外線電圧が放電開始電圧以上かつ充電開始電圧以下の場合には、電力貯蔵媒体を中間充電状態にするように「補充電」「補放電」を行う制御手法である。図5にその概

念を示す。中間より高い充電状態であるほど放電電流を大きくし、低い充電状態であるほど充電電流を大きくすることにより、早期に中間充電状態に近づける。

一方、外線電圧が放電開始電圧以下もしくは充電開始電圧以上であり、力行もしくは電力回生する電車が付近に存在することが明確に確認される場合、従来通りの固定電圧制御を行う。本方式の概念は、「調整充電」、「調整放電」によって電力貯蔵媒体の充電状態を制御する既存の方式³⁾に近い。

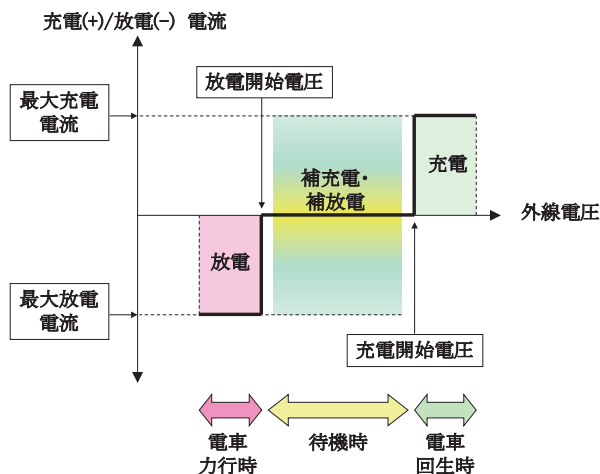


図5 補充電・補放電制御手法の概念

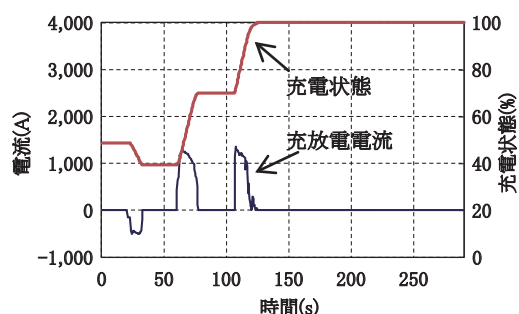
3. シミュレーションによる制御手法の比較

2.2節に示した制御手法の妥当性について、汎用過渡解析シミュレータ (PSIM) を用いて検証した。ここでは、一例として固定電圧制御手法と可変電圧制御手法を比較する。充電状態と充放電電流の計算結果を図6に示す。1時間あたり上下計20本の電車が走行する都市近郊線区のみ電末端に、500 kW相当の電力貯蔵装置を適用した場合を検証対象とした。充放電電流が正の場合は充電電流を表し、負の場合は放電電流を表す。

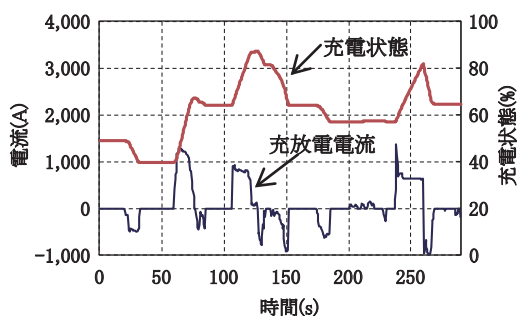
固定電圧制御手法に関しては、図6 (a) に示すように、充電の機会が放電を上回ることによって充電状態が高くなり、120秒後には満充電状態に至った。その後も放電の機会がないまま満充電状態を維持し続けた。一方、図6には示していないが、充電開始電圧と放電開始電圧を上げると、今度は放電の機会が充電を上回り、充電状態が常に低くなった。

可変電圧制御手法の適用時の充電状態は、図6 (b) に示すように、40～80%前後で安定して推移し、充放電が継続した。

電力貯蔵装置により有効活用された電力回生エネルギーは、固定電圧制御手法が3.78 kWhであるのに対し、可変電圧制御手法では4.05 kWhとなった。すなわち、本計算条件においては提案する制御手法により、電力回



(a) 固定電圧制御手法



(b) 可変電圧制御手法

図6 シミュレーションによる制御手法の比較

生エネルギーの利用効率を1割程度増大できることが分かった。

4. 試験による制御手法の比較

2.2節で示した制御手法の有効性を検証するため、電力貯蔵装置の実機を用いた試験を行った。試験においては、「調整充電」「調整放電」の制御が実用化されている実績を考慮し³⁾、概念に近い補充電・補放電制御手法を、充電状態を考慮した制御手法として選択した。

4.1 電力貯蔵装置の主回路構成

製作した電力貯蔵装置は、エネルギー貯蔵媒体であるEDLC、充放電の制御を行う双方向チョップ、フィルタ用コンデンサとリアクトル、直流遮断器で構成されてい

表1 電力貯蔵装置の基本仕様

EDLC	定格容量	500kW (10秒間)
	静電容量	7.875F
	内部抵抗	0.331 Ω
	電圧範囲	500～1,280V (通常時) 1,280～1,480V (短時間)
	中間充電電圧 (新制御)	1,140V
チョップ	定格電圧	直流 1,500V
	チョップ用リアクトル	2.66mH
	フィルタ用コンデンサ	13.2mF
	フィルタ用リアクトル	4mH
	スイッチング周波数	600Hz

特集：電力技術

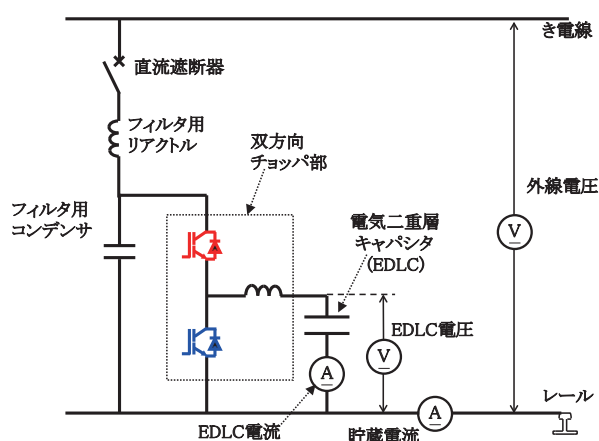


図7 電力貯蔵装置の主回路

る。電力貯蔵装置の主回路構成ならびに仕様を表1、図7にそれぞれ示す。

EDLC全体は、最大電圧160V、静電容量4.5Fのユニットを8直列14並列接続することで(112ユニット使用)、最大電圧1,280V、静電容量7.875Fとした。き電回路と電力貯蔵装置との間で生じる共振現象を低減するため、フィルタリアクトルは4mHとした。さらに、双方向チョッパ部のスイッチング周波数は600Hzに設定した。

補充電・補放電制御手法を適用する場合、EDLCの最大電圧は1,480Vに設定することができる。これは従来制御適用時の最大電圧1,280Vと比較して、EDLCの最大エネルギーを約30%増大できることを意味する。補充電・補放電制御適用時では、電車の回生電力の充電に伴い充電電圧が1,280～1,480Vの範囲に達しても、外線電圧が充電開始電圧以下であれば、補放電の機能によって中間充電電圧(1,140V)に向けて放電される。つまり1,280～1,480Vの充電状態が短時間に限定される場合、EDLCの寿命に特段の悪影響を与えることがないレベルまで充電電圧を高く設定することができる。従って、電力貯蔵装置の充電容量が実質的に大きくなり、可変電圧制御手法よりも大きな効果が期待できる。なお、本試験においては、EDLCの中間充電電圧を1,140Vに設定した。

外線電圧に関しては、固定電圧制御手法、補充電・補放電制御手法ともに、充電開始電圧と放電開始電圧を1,650V、1,450Vにそれぞれ設定した。

4.2 検証試験の回路構成

検証試験は鉄道総研構内の試験線を用いて行った。試験回路(直流1,500V系)の全体構成を図8に示す。試験線の両端からき電することで、1台の整流器による並列き電方式を模擬した。試験線は短いため、試験回路に抵抗を挿入することにより、整流器と電力貯蔵装置間、及び電力貯蔵装置と電車間のき電回路抵抗を模擬した。

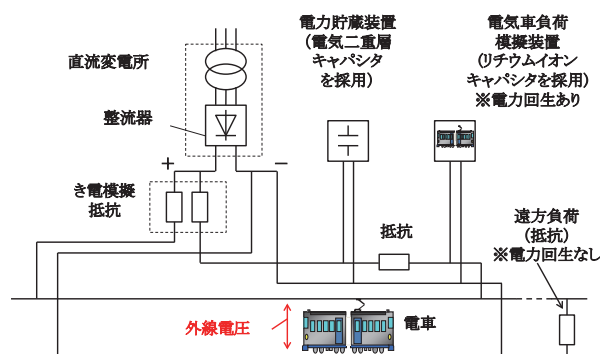


図8 試験線を用いた試験回路

これにより、電車走行時に外線電圧が大きく変動する。試験における整流器と試験線の間、ならびに整流器と電力貯蔵装置の間に接続される正極側のき電模擬抵抗は、何れも1.0Ωとした。一方、電力貯蔵装置と電気車負荷模擬装置の間に接続される正極側の抵抗は、0.1Ωとした。

電車には、鉄道総研が所有する電力回生可能な試験車両を用いた。試験線走行時の電車の最大速度は45km/h、最大負荷電力は800kW程度である。試験線の1走行あたり距離は約600m、時間は1分20秒程度である。なお、試験のインターバルは5分とした。

また、通常存在する遠方の力行電車を想定して、電車走行終了後に16Ωの抵抗を30秒間挿入した。

4.3 電気車負荷模擬装置

電力貯蔵装置を適用することによる省エネルギー効果を検証するには、力行車と回生車が重なる条件を模擬する必要がある。そこで、指令した負荷電流パターンに従って、電力を充放電する電気車負荷模擬装置を製作した。上記装置は、リチウムイオンキャパシタ(Lithium ion Capacitor: 以下LiCと略す)を電力貯蔵媒体とする図7と同等の電力貯蔵装置である。LiCが充電することで電車の力行を、逆に放電することでその電車の回生を模擬する。LiCはキャパシタセルの最大充電電圧と負極の静電容量を増加させることで、EDLCの弱点であったエネルギー密度を改善できる。ただし、LiCは通常のキャパシタと異なり完全放電することはできず、また充電電圧に制約がある。

基本仕様を表2に示す。1モジュールは12セルのLiCで構成される。1モジュールあたりのLiCの電圧範囲は27～45V、静電容量は166F、内部抵抗は19mΩである。表2に示すLiCは、112モジュールを14直列8並列に接続して構成される。

電気車負荷模擬装置に指令として与える負荷電流パターンを図9に示す。図9の①～⑧に示す電流、時間を指定する。

試験時に適用した負荷電流パターンの設定値を表3に

表2 電気車負荷模擬装置の基本仕様

LiC	定格容量	460kW (5秒間)
	静電容量	94.8F
	内部抵抗	0.034 Ω
	電圧範囲	400 ~ 630V
チョッパ	定格電圧	直流 1,500V
	チョップ用リアクトル	10mH
	フィルタ用コンデンサ	18mF
	フィルタ用リアクトル	2mH
	スイッチング周波数	500Hz

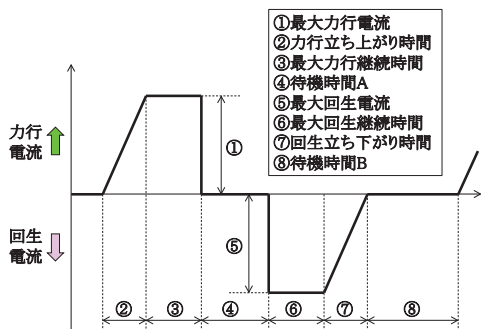


図9 電気車負荷模擬装置の負荷電流パターン

表3 電気車負荷模擬装置の負荷パターン設定値

①最大力行電流	250A	⑤最大回生電流	150A
②力行立ち上がり時間	5s	⑥最大回生継続時間	8s
③最大力行継続時間	5s	⑦回生立ち下がり時間	5s
④待機時間A	15s	⑧待機時間B	300s

示す。電気車負荷模擬装置の回生と電車の力行が重なるようにした。また、最大力行電流と最大回生電流の比は、5:3に設定した。

4.4 検証試験の結果

4.4.1 電力貯蔵装置がない場合の特性

図10は電力貯蔵装置を動作させない状態で、電車が試験線を2回走行したときの、パンタ点電圧（電車における外線電圧）と負荷電流の測定結果である。なお、ここでは電気車負荷模擬装置は動作していない。変電所電流は負荷電流と等しく、最大550A程度であった。電車力行時の変電所電圧は1,560Vであったが、パンタ点電圧は1,300V付近まで低下した。一方、電車がブレーキをかける際、電力貯蔵装置が接続されていないため、回生電力を吸収することができず、変電所電圧とパンタ点電圧は1,850V付近まで達して回生失効に至った。

4.4.2 固定電圧制御手法の特性

図11は電力貯蔵装置を固定電圧制御手法で動作させたときの測定結果である。電気車負荷模擬装置の回生と電車の力行が重なるため、電圧降下は小さい。そのため電力貯蔵装置の放電深度と充電深度が小さくなり、電力回生エネルギーを十分に吸収しきれなかった。その結果、図10と同様にパンタ点電圧は1,850V付近まで達して

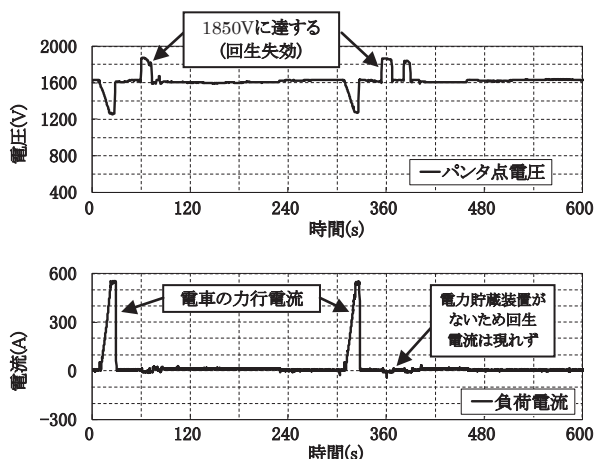


図10 電力貯蔵装置なし時の電力特性

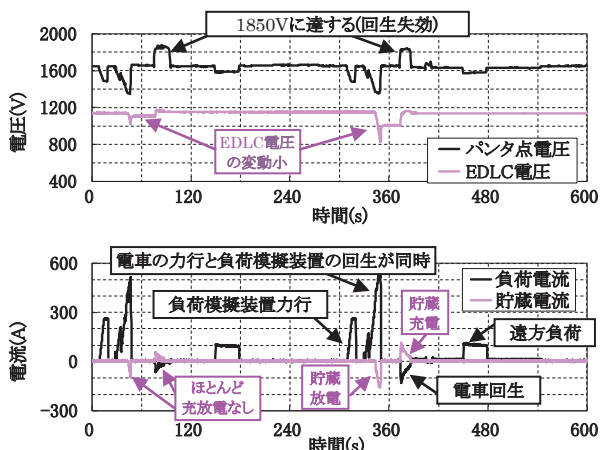


図11 固定電圧制御適用時の充放電特性

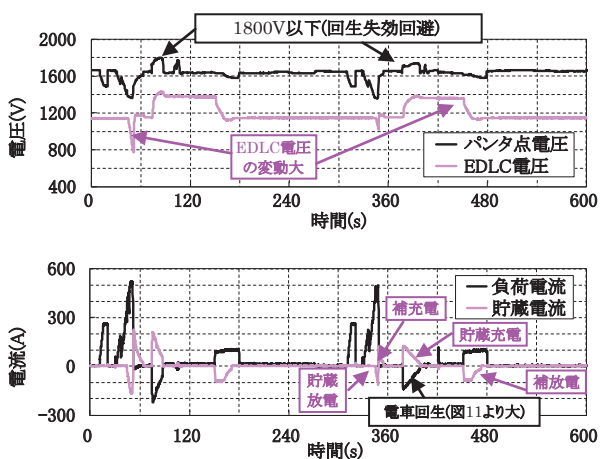


図12 補充電・補放電制御適用時の充放電特性

回生失効に至った。負荷が電車1編成のみの場合、電力貯蔵装置は充電と放電のバランスが保たれて効果的に充放電したが、複数の電車負荷が混在する場合においては充電状態が偏る傾向になる。

4.4.3 補充電・補放電制御手法の特性

図12は電力貯蔵装置を補充電・補放電制御手法で動

特集：電力技術

作させたときの測定結果である。図 11 の固定電圧制御手法と同様、電車の力行と電気車負荷模擬装置の回生が重なるため、電力貯蔵装置の通常の放電は抑制される。しかしながら、補放電の機能によって、待機期間中に EDLC を中間充電状態にするため、2 回目の電車回生時 (380 ~ 400s) においても、1 回目 (75 ~ 90s) と同等の電力回生エネルギーを吸収し、回生失効も回避した。すなわち、複数の電車が混在する状況においても、より多くの電力回生エネルギーを有効活用することができた。また、パンタ点電圧の最大値が 1,800V 程度、最小値が 1,400V 程度であり、電圧の変動幅が図 10、図 11 と比較して小さくなり、電圧安定化に寄与した。

固定電圧制御手法の場合、充電開始電圧、放電開始電圧の設定が最適値から若干でも隔たりがあると、図 11 に示したように効果的な充電が得られなくなる。一方、補充電・補放電制御手法では、充電開始電圧と放電開始電圧の設定に依存せず充電と放電のバランスを保つことが可能となり、電車の力行、回生に応じた充電が実現できた。また、固定電圧制御手法よりも外線電圧を安定制御することができた。特に、電圧上昇の抑制には有効であった。

4.4.4 エネルギーの比較

図 10 ~ 12 の電車一往復走行時の充電によるエネルギーの比較結果を表 4 に示す。なお、条件を揃えるため、電気車負荷模擬装置の力行・回生に伴い発生・消費したエネルギーは除いている。

表 4 エネルギーの比較

	電力貯蔵装置なし	固定電圧制御	補充電・補放電制御
変電所の送り出しエネルギー [A]	7.9kWh	6.5kWh	5.8kWh
電車の消費エネルギー [B]	6.5kWh	4.8kWh	4.3kWh
発生した損失エネルギー [A]-[B]	1.4kWh	1.7kWh	1.5kWh

「電力貯蔵装置なし」の条件で、変電所送り出しエネルギーが最大になった。これは、電車の電力回生エネルギーがほとんど活用できなかったことによる。

「補充電・補放電制御」を「固定電圧制御」と比較すると、補充電、補放電の機能により、有効活用できる電力回生エネルギーが増加し、電車の消費エネルギーが低減した。それに伴い、変電所の送り出しエネルギーも 10% 程度低減した。「電力貯蔵なし」と比較すると 25 % 以上低減した。

一方、損失エネルギーに関しては、「電力貯蔵装置なし」の条件が最も小さい値になった。これは、電力貯蔵装置の双方向チョッパの変換器損失や、EDLC の内部抵抗損失によるものと考えられる。従って、有効活用される電力回生エネルギーが、充電によって発生する損失エネルギーを大きく上回ることも重要である。

5. まとめ

直流電気鉄道のさらなる省エネルギー化を目的に、電力貯蔵装置の適用と新しい制御手法を提案した。1 編成の電車と電気車負荷模擬装置による、電力貯蔵装置の充電試験を行うことにより、従来の固定電圧制御手法と補充電・補放電制御手法の比較検証を行った。その結果、補充電・補放電制御手法の機能により、充電と放電のバランスを保つことが可能になった。また、有効活用できる電力回生エネルギーの増大、総合効率の向上も確認できた。今後の地上用電力貯蔵装置の導入にあたり、適用効果向上の一助になりうるものと期待される。

なお、本研究の一部は国土交通省の技術開発費補助金を受けて実施したものである。

文献

- 1) 長谷伸一：電力エネルギー技術の動向，鉄道と電気技術，Vol.19, No.8, pp.3-8, 2008
- 2) 岡村勉夫：電気二重層キャパシタと蓄電システム，日刊工業新聞社，pp.1-23, 1999
- 3) 相原徹：リチウムイオン電池を用いた電力補完装置の導入，鉄道と電気技術，Vol. 18, No. 4, pp.3-9, 2007
- 4) 星吉輝，東直親：鹿児島市交通局向け架線電圧補償システムの概要，鉄道と電気技術，Vol.19, No.8, pp.41-46, 2008
- 5) 鳥塚正行，児玉茂樹，細谷和弘，吉山栄二：大容量ニッケル水素電池（ギガセル）を用いた鉄道システム用地上蓄電装置，鉄道と電気技術，Vol.22, No.4, pp.14-20, 2011
- 6) 本田直志，清水孝浩，蔦川 秀，諏澤 暁，平松正宣，高橋 慎，小西武史，長谷伸一：直流電気鉄道の電力回生エネルギー吸収用キャパシタの適用，平成 20 年電気学会全国大会，Vol.5, No.5-55, pp.87-88, 2008
- 7) 小西武史，重枝秀紀，吉井剣，高橋慎，平松正宣：複合する電車負荷による地上用電力貯蔵装置の検証試験，平成 24 年電気学会産業応用部門大会，No.5-30, pp.257-260, 2012