

# 回生エネルギー貯蔵システム

竹岡俊明\* 畠中啓太\*  
松村 寧\* 山田健一\*\*  
北中英俊\*

Advanced Technologies for Regenerative Brake Energy Storage System

Toshiaki Takeoka, Yasushi Matsumura, Hidetoshi Kitanaka, Keita Hatanaka, Kenichi Yamada

## 要 旨

CO<sub>2</sub>排出量削減をはじめとする環境負荷低減への社会的要請は、ますます強くなっている。鉄道は“環境の優等生”ではあるが、更なる省エネルギー化、環境優位性の向上を図っていく必要がある。

電気鉄道の特長は、ブレーキ時の回生電力を、架線を通して他の車両で再利用することで省エネルギー化が可能なことである。しかし、近くに別の力行車両が存在しないなど架線下に十分な回生負荷がない場合、回生ブレーキが十分に作用せず、機械的なブレーキを併用することとなり、制動エネルギーの一部を熱として放散している。

本稿では、更なる省エネルギー化を実現する新技術として、蓄電池を用いた電力貯蔵システムの開発について述べる。電力貯蔵システムは、余剰となる回生電力を貯蔵し、必要なときに再利用できるようにしたシステムであり、鉄道の省エネルギー化に寄与するものである。

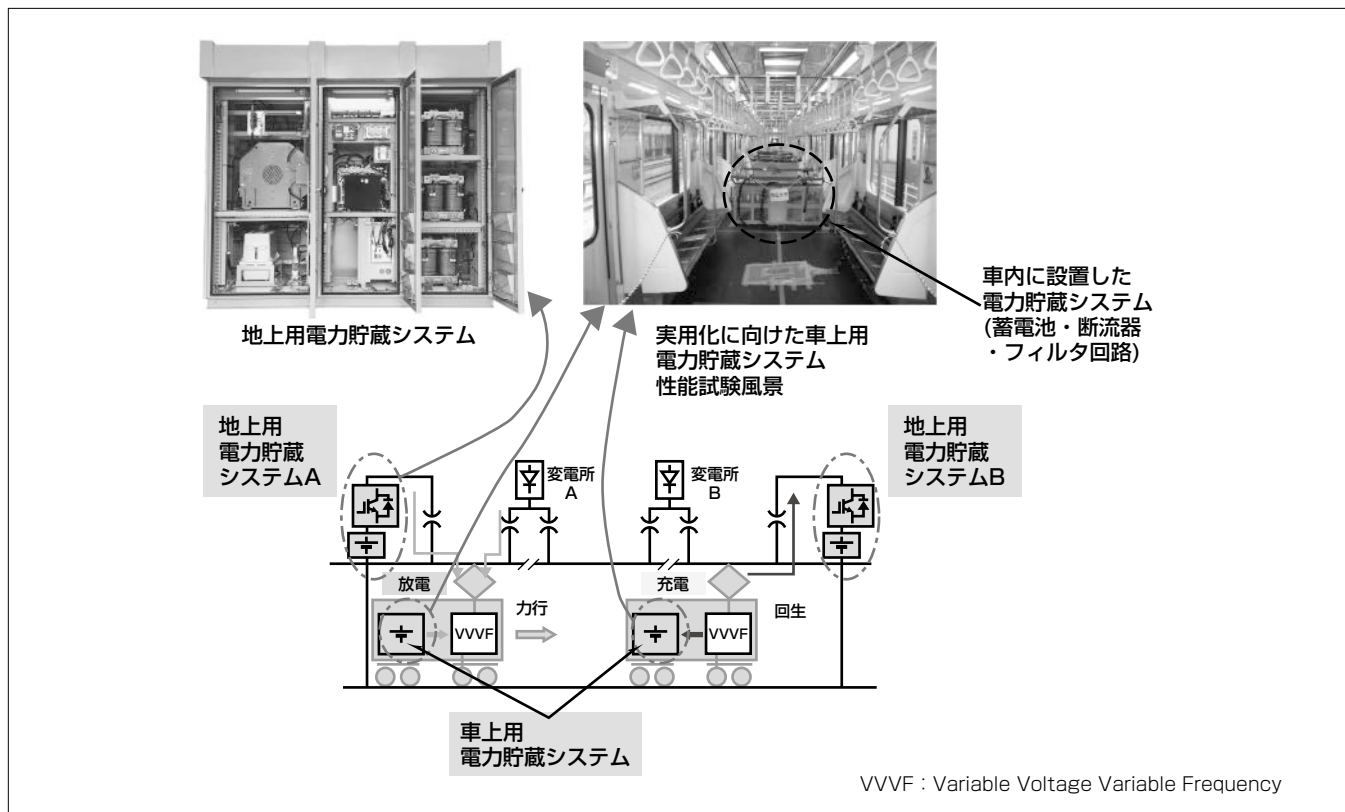
電力貯蔵デバイスにはリチウムイオン電池を採用し、車上用システム、地上用システムとも、パワーエレクトロニクス技術を駆使し、電力貯蔵デバイスへの充放電制御を行う構成とした。

また、車上用システムは小田急電鉄株の路線で走行試験を行い、充放電制御の良好な動作と、回生率改善への寄与を確認した。

地上用システムは、車上用システムで開発した要素技術を生かし、地上設備として必要な機能を付加して構成した。

さらに、車上用システム、地上用システムの最適配置、電力貯蔵デバイスの最適化を図るツールとして、新たに両システムを統合して取り扱える統合電力シミュレータを開発し、システムの最適化検討を可能とした。

これらの技術を生かし、今後も更なる環境負荷低減を図るための製品開発を推進していく所存である。



## 鉄道システムにおける電力貯蔵システムの運用

現在の鉄道車両で主流の回生ブレーキは、ブレーキ時に発生した回生電力を、別の力行車両で利用するシステムである。しかし負荷となる力行車両が存在しないときは、回生ブレーキが十分に作用しないために機械的なブレーキ力を併用することとなり、制動エネルギーの一部は再利用できず、熱として放散していた。今回開発した電力貯蔵システムは、余剰となった回生電力を貯蔵して、必要なときに再利用できるシステムである。車上と地上の電力貯蔵システムの最適化を図ることで、更なる省エネルギー化を実現できる。

\*三菱電機株 伊丹製作所 \*\*小田急電鉄株

# 1. ま え が き

CO<sub>2</sub>排出量削減をはじめとする環境負荷低減への社会的要請は、ますます強くなっている。鉄道は“環境の優等生”ではあるが、更なる環境優位性の向上を図っていく必要がある。

本稿では、小田急電鉄株の実際の路線、車両を使った回生エネルギー貯蔵システムの開発について述べる。具体的には、蓄電池を用いて省エネルギー化を実現させる車上用と地上用電力貯蔵システムの開発試験と、更に車上／地上の最適化を可能とする統合電力シミュレータの開発について述べる。

# 2. 開発コンセプト

電力貯蔵システムの開発コンセプトは、鉄道における更なる省エネルギー化の実現と回生ブレーキの安定化である。

電気鉄道の特長は、ブレーキ時の回生電力を、架線を通して他の車両で再使用することで省エネルギー化が可能なことである。しかし、近くに別の力行車両が存在しないなど架線下に十分な回生負荷がない場合、回生ブレーキが十分に作用せず、機械的なブレーキを作用させて、制動エネルギーの一部を熱として放散している。また、回生負荷の変動は回生ブレーキ力の変動を発生させ、車両の乗り心地を悪化させたり、停止精度にも影響を与える。

そこで、車上配置と地上配置の電力貯蔵システムを開発し、回生電力の吸収・再利用を最適に行うことで、更なる省エネルギー化と安定な回生ブレーキ力の確保による車両性能の向上を図ることとした。

# 3. 電力貯蔵システム

## 3.1 電力貯蔵デバイスの選定

電力貯蔵デバイスとしては、エネルギー密度、出力密度の大きいリチウムイオン電池を採用した。

なお、今後の技術動向に注視し、最適な電力貯蔵デバイスの選択を行っていく方針である。

## 3.2 電力貯蔵システムの構成

扉ページに鉄道における電力貯蔵システムの構成を図示した。車上配置、地上設置のシステムとも、パワーエレクトロニクス技術を駆使したDC／DCコンバータ装置によって電力貯蔵デバイスへの充放電制御を行う構成とした。

# 4. 車上用の電力貯蔵システムの開発

## 4.1 架線電圧リミッタについて

電気鉄道車両の特長は、ブレーキ時の回生電力を、架線を通して他の車両で再使用することで省エネルギー化が可能なことである。この利点を最大限に生かすには、車両のブレーキ時に発生する回生電力は架線を通して別の力行車

両で消費されることが望ましい。しかし、回生車両と力行車両の距離が離れていたり、回生電力が大きく別の車両で十分に消費できない場合は、架線電圧が上昇する。この際、架線電圧が一定値以上とならないように、VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ装置では架線電圧リミッタ制御によって回生ブレーキトルクの絞り込み（回生絞り込み）を行い、不足するブレーキ力は機械的なブレーキを併用して車両を減速させている。この際、機械ブレーキによって制動エネルギーの一部は熱として無駄に消費している。

## 4.2 電力貯蔵システムの開発

ブレーキ時に架線下に十分な回生負荷がない場合に、車上配置した電力貯蔵デバイスに回生電力を吸収し、回生絞り込みを抑制するシステムを開発し、実車両を使って回生電力の充電制御、力行や惰行時の放電制御を確認した。

小田急電鉄株の3000形通勤車（6両編成）を対象とし、電力貯蔵システムは既存のVVVFインバータ装置（床下機装（ぎそう））を改造してDC／DCコンバータ装置として使用し、車内にはフィルタ回路、断流器類、電力貯蔵デバイスの各機器を設置した。

扉ページに試験風景写真を示す。また、表1に試験概要を示す。

### 4.2.1 制御方式

図1に車上での電力貯蔵システム構成図を示す。試験車両はTIOS（列車情報制御システム）を持っており、ブレーキ時にVVVFインバータ装置（M1車）の架線電圧リミッタによって生じた回生絞り込み量をDC／DCコンバータ装置（M3車）に伝送し、DC／DCコンバータ装置はこの回生絞り込み量に基づいて、充電電流を制御する構成とした。蓄電池への充電電流は最大400Aとした。

また、力行時は架線電圧と編成力行電力に基づき、最大200kWで力行アシスト放電を行い、惰行時は一定電流（電池電流100A）で惰行放電を行う構成とした。

### 4.2.2 試験結果

約2か月の工程で、昼間と夜間、過密路線と閑散路線で走行試験を実施した。試験条件は、電力貯蔵システムを動作させた場合（最大400A吸収）と未動作の場合であり、それぞれ回生率（力行電力量に対する回生電力量の割合）及び回生有効率（モータ性能上回生可能な電力量に対する実回生電力量の割合）を比較した。

なお、各試験日の同じダイヤで走行試験を実施した場合でも、試験車と他の車両の力行や回生ブレーキのタイミングが同じではなく、個々のデータにはばらつきが含まれる

表1. 電力貯蔵システムの試験概要

|       |                             |
|-------|-----------------------------|
| 試験車両  | 小田急電鉄株式会社 3000形車両           |
| 走行区間  | 多摩線、小田原線（経堂～小田原間）           |
| 蓄電池仕様 | リチウムイオン電池 605V－30Ah（約18kWh） |

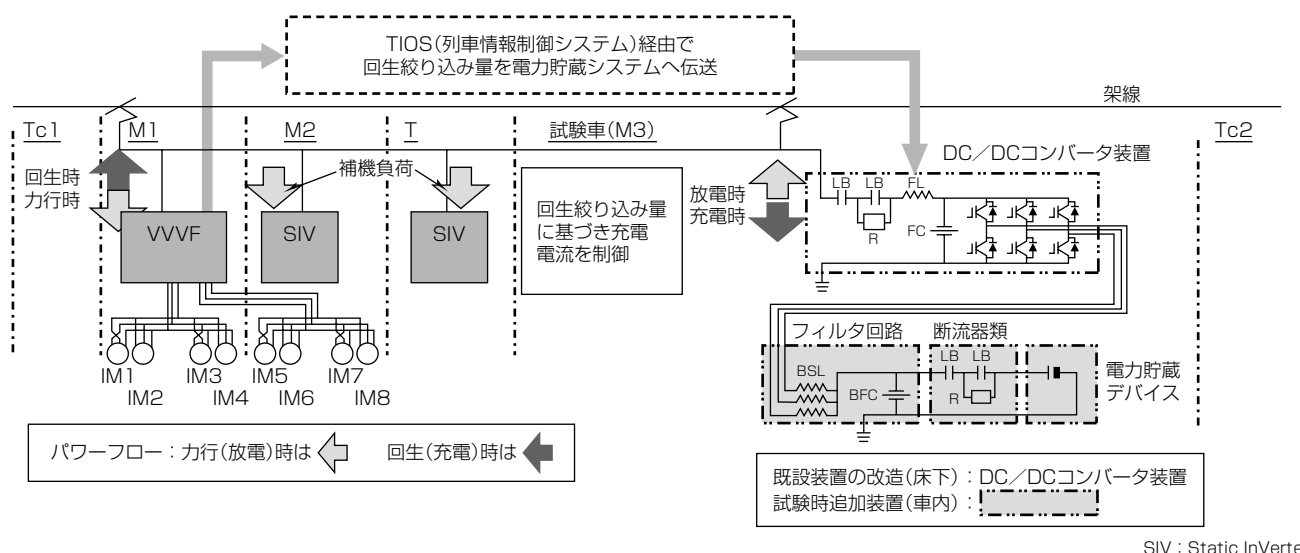


図1. 車上用電力貯蔵システム構成図

表2. 電力貯蔵システム 再生電力向上の改善効果

・夜間走行試験（海老名-伊勢原 往復平均）

| 電力貯蔵システム | 回生率(%) | 回生有効率(%) | 往復数(回) |
|----------|--------|----------|--------|
| 動作時      | 8.1    | 20.7     | 2      |
| 未動作時     | 3.4    | 7.4      | 2      |
| 改善ポイント   | +4.7   | +13.3    |        |

・昼間走行試験

（非過密区間：新百合ヶ丘-唐木田 往復平均）

| 電力貯蔵システム | 回生率(%) | 回生有効率(%) | 往復数(回) |
|----------|--------|----------|--------|
| 動作時      | 35.8   | 80.7     | 23     |
| 未動作時     | 32.8   | 75.8     | 17     |
| 改善ポイント   | +3.0   | +4.9     |        |

（非過密区間：海老名-小田原 往復平均）

| 電力貯蔵システム | 回生率(%) | 回生有効率(%) | 往復数(回) |
|----------|--------|----------|--------|
| 動作時      | 24.3   | 61.3     | 16     |
| 未動作時     | 20.8   | 54.6     | 7      |
| 改善ポイント   | +3.5   | +6.7     |        |

（過密区間：経堂-海老名 往復平均）

| 電力貯蔵システム | 回生率(%) | 回生有効率(%) | 往復数(回) |
|----------|--------|----------|--------|
| 動作時      | 33.9   | 82.9     | 2      |
| 未動作時     | 32.1   | 77.6     | 2      |
| 改善ポイント   | +1.8   | +5.3     |        |

ため比較評価が難しい。そこで、可能な限り多くのサンプル数を取り、平均値で評価することにした。

表2に再生電力向上の改善効果を示す。

電力貯蔵システムの動作時と未動作時を比較すると、夜間走行では、回生率は約5%、回生有効率は約13%向上し、昼間走行では、回生率は約2~3%、回生有効率は約5%程度向上した。また、電力貯蔵システム動作時、夜間と昼間の走行試験結果を比較すると、夜間では架線下の負荷が少ないため、回生率、回生有効率は低いが、電力貯蔵システムの蓄電容量を増やすことで改善は可能である。

電力貯蔵デバイスの容量の制約があるものの、充放電制御が良好に動作し、回生率改善への寄与を確認した。

## 5. 地上用システムへの電力貯蔵システム適用

電気鉄道の直流き電システムにおける電力貯蔵システム

は、次の技術課題への適用に期待が寄せられている。

- ①省エネルギー：回生有効率の向上
- ②回生失効対策：乗心地改善、定点停止精度確保
- ③ピーク電力補償：変電所パワー不足時の電力補償

従来各課題に対し、抵抗チョッパシステム、電力回生インバータシステム、フライホイールシステムを適用してきた。これらの適用実績を活かし、地上用電力貯蔵システムを開発した。

### 5.1 電力貯蔵デバイスを用いたシステム構成

扉ページに地上用電力貯蔵システムの外観を示す。図2に地上用電力貯蔵システム回路構成、図3に制御特性イメージを示す。

電力貯蔵デバイスの充放電制御を行う昇降圧チョッパは、車両用VVVFインバータ装置として実績のあるIGBT適用パワーユニットを使用した。基本ピーク容量を690kW、4.5分繰返し、キャリア周波数は720Hz、600Hzとし、チョッパの基本周波数を12パルス変電所整流器のリップル周波数と合わせることで、き電側へのノイズ影響の低減を図った。

制御特性はフライホイールシステムで実績のあるき電電圧-電流のパターン制御方式とし、電池条件による絞り込み制御を付加して積極的に回生電力を吸収させる回生優先モードと電圧補償モードを設けている。

制御盤は、マンマシンインタフェースを内蔵した遠隔制御機能を持ち、光ケーブル伝送で昇降圧チョッパの制御特性設定、モード切替え、計測を可能としている。

### 5.2 車上・地上システム統合電力シミュレータの開発

電力貯蔵システム導入による最適き電システムの検討に、複雑な路線構成や列車運用、更に車上/地上用電力貯蔵システムを扱える統合電力シミュレータ“PETS-DC”を開発し、実際の路線を使った電力シミュレーションを行った。

図4にシミュレーションに用いた地上用電力貯蔵システム

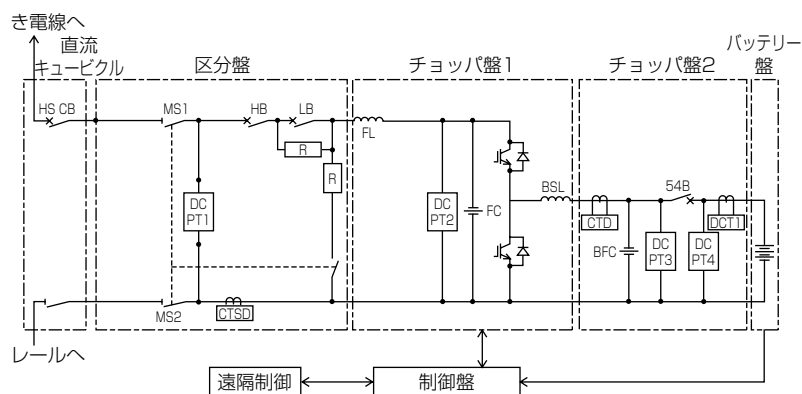


図2. 地上用電力貯蔵システム回路構成

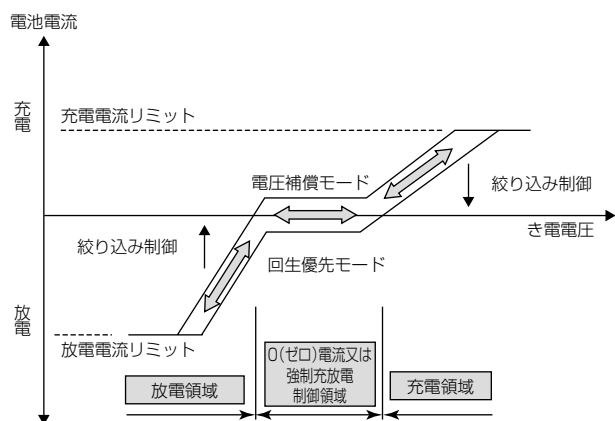


図3. 制御特性イメージ

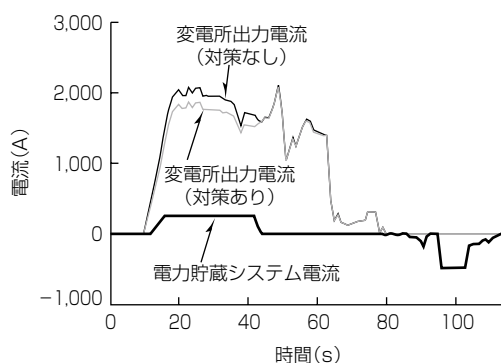


図5. 地上設置のシミュレーション例

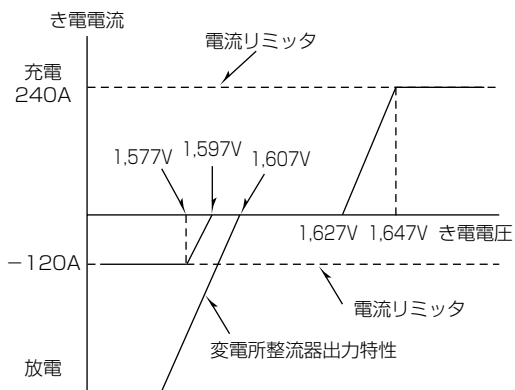


図4. 地上用電力貯蔵システムの特性例

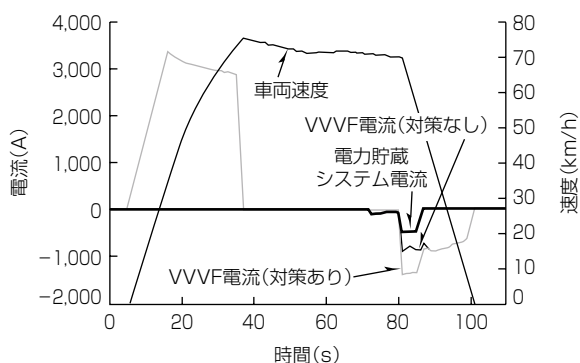


図6. 車上配置のシミュレーション例

ムの特性例を示す。変電所整流器無負荷電圧を1,607Vとし、充放電エネルギー量を1.5kWh、充電開始電圧を1,627V、放電開始電圧を1,597Vとして、20Vの電圧差で電流リミッタを働かせている。車上においても同様に充放電開始電圧とリミッタを持った特性を設定している。図5には、電力貯蔵システムを変電所に地上設置した場合の電流挙動、図6には車上に配置した場合の電流挙動、及び車両速度の様子を例示した。地上設置では高負荷時変電所出力の一部を電力貯蔵システムからの放電で補うことによって変電所出力低減に寄与し、変電所出力電流がないときに電力貯蔵システムに充電していることがわかる。

車上配置では車両減速時、電力貯蔵システムが回生電力を回収し、VVVF電流(回生電流)が多くなったことがわかる(図中の対策有無は電力貯蔵システムの有無)。

## 6. む す び

今回、電力貯蔵システムの開発にあたり、電力貯蔵デバイスや充放電制御方式を車上と地上のシステムで共用化して、実際の車両での走行試験を実施し、変電所設備での実用化に向けた試験に取り組んでいる。今後は、これらの技術を活かし、更なる環境負荷低減を図るための製品開発を推進していく所存である。