

リチウムイオン電池を採用した 電鉄用電力貯蔵システムの開発

Development of New Energy Storage System with Lithium-Ion Batteries for Electric Railways

瀬山 幸隆* 岡崎 賢二* 東 直親** 作野 敏郎**

Yukitaka Seyama Kenji Okazaki Naochika Higashi Toshiro Sakuno

Abstract

A new energy storage system with lithium-ion batteries for electric railways has been developed in cooperation with Toyo Electric Mfg. Co., Ltd. A feature of this system is the first adoption of lithium-ion batteries with high power input-output performance as a functional device capable of storage of regenerated energy produced by deceleration of electric train and supply of it to the train starting or accelerating, which is effective to suppress the line voltage going up and down and to save energy. The high input-output performance of this system will be verified by the continued field test in the commercial line of West Japan Railway Company Ltd.

Key words : Energy storage system ; Electric railway ; Lithium-ion battery ; Regenerated energy

1 はじめに

近年、地球温暖化等の環境問題がクローズアップされ、多くの業種で太陽光発電に代表されるクリーンエネルギー導入や、コージェネレーションなどの省エネルギー化が進められている。大量の電力を消費する鉄道においても省エネルギー化が課題であり、従来から電力利用効率化の取り組みがおこなわれてきた。その有効な手段が回生電力の利用であり、電池、キャパシタ、あるいはフライホイールなど様々な電力貯蔵媒体の利用が検討されている。その一つに、鉛蓄電池を使用したシステムがあげられる。これは、車両制動時に

発生する回生電力を電池に吸収(充電)し、その電力を他の車両の力行*時に放出(放電)するシステムである。しかしながら、車両制動時に発生する回生電力は数百kWの大電力である。システム導入には大電力を吸収できる高性能蓄電池の適用が不可欠であった。鉛蓄電池を使用したシステムの導入が検討されたこともあったが、電池の質量およびスペースの点で実用化に至らなかった経緯もある。電池の小形軽量化、および高入出力化が電力貯蔵システムの最大の課題であった。

当社は、従来の蓄電池と比較して小形軽量かつ高入出力という特長をもつ大形リチウムイオン電池の開発を完了し、さらにこの電池を使った電鉄用電力貯蔵シ

* 研究開発センター 第二開発部

** (株)ジーエス・ユアサ パワーサプライ 製造部

* 直流電気鉄道車両が始動・加速する過程を力行運転と呼ぶ。

システムを東洋電機製造株式会社と共同開発した。現在、本システムは西日本旅客鉄道株式会社線の営業線にてフィールドテストで性能評価を実施中である。本報告では、そのシステムの概要を紹介する。

2 システムの概要

直流電気鉄道車両の力行運転時には、架線より電力を消費するので架線電圧は低下する。その電圧低下は、他の車両を含めた駆動力の不足を生じさせることになる。逆に同車両が、電気ブレーキにより停止に至る過程では、運動エネルギーを電気エネルギーとして架線側へ放出（回生）する。このとき、回生車両以外の他の車両によって、このエネルギーが消費されなければ、架線電圧が上昇する。その場合、正常に車両停止させるためには、機械式ブレーキを併用しなければならない。この状態を回生失効と呼んでおり、回生電力の有効活用の面から、回避しなければならない。この力行・回生運転時に架線側で消費・発生するエネルギーの一部をリチウムイオン電池でアシストさせるのが、電力貯蔵装置システムの機能である。この装置は、双方向DC/DCコンバータを介して放電・充電のエネルギーサイクルをおこなわせるものである。そのコンバータには回生吸収（優先）モードと、電圧補償（優

先）モードとがあり、システムの設置環境に合わせた運転モードの選択が可能である。

2.1 システムの構成

フィールドテスト用で実機稼動させた適応事例として、その電力貯蔵システムの構成を Fig. 1 に示す。直流電気鉄道の標準電圧 DC 1500 V の架線に断路器を介して、双方向 DC/DC コンバータを接続し、その二次側には、電力貯蔵装置として、リチウムイオン電池を接続する。コンバータは、架線側の電圧変動範囲で DC 900 ~ 1850 V（最大電流 270 A）、リチウムイオン電池側の電圧変動範囲で DC 500 ~ 780 V（最大電流 570 A）を適正稼動範囲内として、電流制御動作する。また、リチウムイオン電池は、公称容量 60 Ah で公称電圧 655 V（総セル数 182 個）であり、その充放電特性は、10 ItA（600 A）が可能な高性能となっている。参考のために、システム構成の仕様および設置の外観写真を Table 1 および Fig. 2 にそれぞれ示す。

2.2 システムの動作

回生（優先）運転モードにおける動作例を Fig. 3 に示す。本例では、架線電圧が、DC 1400 ~ 1700 V の範囲内にあるときには、システムは待機状態にある。回生電力により、架線電圧が DC 1700 V を超えると、DC 1750 V までの間、電流制御をおこないながら最大で 570 A までの電流が、リチウムイオン電池に回

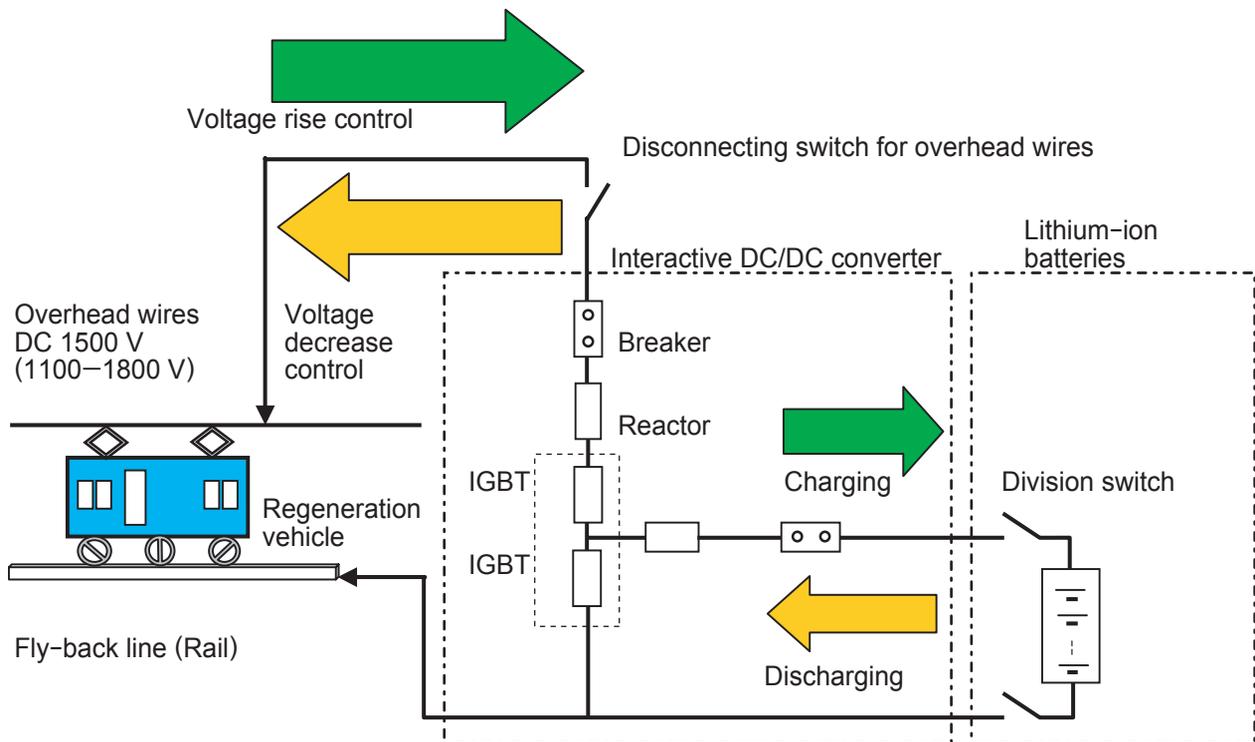


Fig. 1 An application of energy storage system for electric railways with lithium-ion batteries.

Table 1 Specifications of an energy storage equipment.

Energy storage equipment		Specifications	
Operation mode		Regeneration storage Voltage compensation	
Maximum rating of system	Regeneration storage	390 kW / 30 sec.	
	Voltage compensation	350 kW / 30 sec.	
Interactive DC/DC converter	Voltage / V (DC)	Overhead wires	900 - 1850
		Battery	500 - 780
	Current / A (DC)	Overhead wires	270
		Battery	570
Lithium ion battery (LIM60H-182)	Nominal capacity / Ah	60	
	Nominal voltage / V	655	
	Number of total cells	182 - series	
	Module composition	7cell module × 26 pieces	
	Charge performance	10 #A (600 A) × 30 sec.	
	Discharge performance	10 #A (600 A) × 30 sec.	

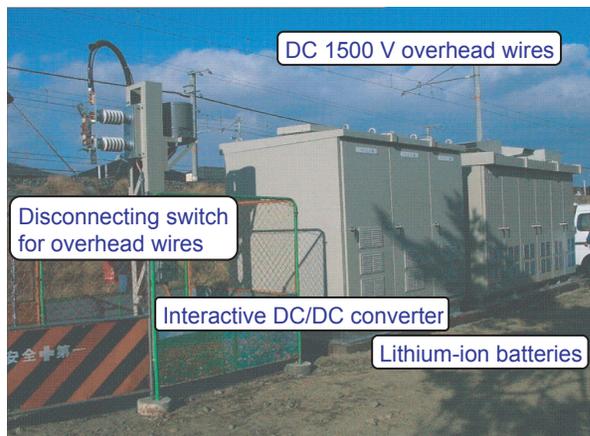


Fig. 2 External appearance of installation for energy storage system.

生(充電)する。さらに、架線電圧が上昇し、DC 1850 Vを上回った時点でシステムを停止させる。逆に、架線電圧がDC 1400 Vまで降下すると、DC 1300 Vまでの間、電流制御をおこないながら最大で300 Aまでの電流がリチウムイオン電池から放出(放電)する。さらに電圧が低下し、DC 1100 Vを下回った時点でシステムを停止させる。参考のために、装置の動作状況をFig. 4に示す。図から架線電圧の変動にともない、本システムに搭載されたりチウムイオン電池が充放電されていることがわかる。

2.3 電池の制御

今回、新規開発したりチウムイオン電池には、専用の監視装置を装備している。これは、過充電・過放電から電池を保護するためのもので、電池単セルご

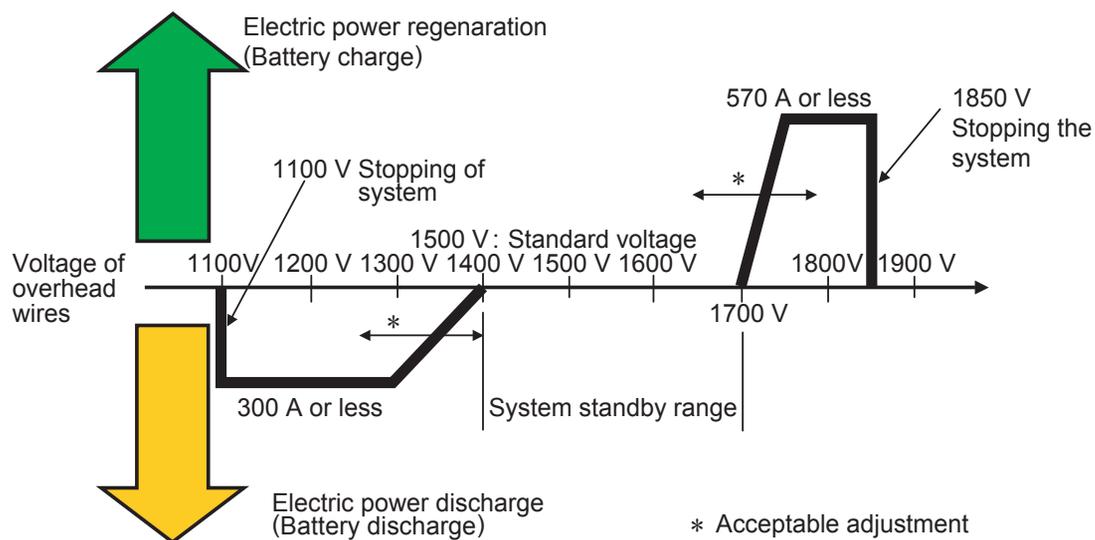


Fig. 3 Example of operation characteristic for energy storage system: regeneration absorption priority mode.

Table 2 Protection-synchronization of battery control part for new energy storage system.

Watching items	Judgement items	Main machine operation for converter-equipment
Prealarm	Voltage drop of single cells	Standby for operation
Charge switch	Voltage rise of single cells	Standby for operation
Prohibition of use	Overcharge and overdischarge of single cells	Operation stop (Breaker opening)
Emergency stop	Mechanical sensor	Operation stop (Breaker opening)

Table 3 Specifications of LIM60H type lithium-ion cell.

		Specifications
Nominal capacity / Ah		60
Nominal voltage / V		3.6
Dimensions / mm	Width	170
	Thickness	92
	Height	115 ¹⁾
Mass / kg		4
Maximum current / A	Charge	600 ²⁾
	Discharge	600 ²⁾

1) Except terminal bolts
2) Under 30 second

とに、その状態を常時監視する。この監視装置から発報した各種警報（警告）は、双方向 DC/DC コンバータへ送信され、所定の保護連動動作として処理する。Table 2 に電池に関する保護連動表を示す。

3 LIM60H 形リチウムイオン電池

リチウムイオン電池は、正極にリチウム含有遷移金属複合酸化物、負極にリチウムを吸蔵・放出できる炭素材料、セパレータに多孔性のポリオレフィン膜、および電解液に炭酸エステル系のものを用いた高容量・高入出力を特長とする二次電池である。本システムに採用した LIM60H は、高エネルギー密度で、かつ最大 10 ItA (600 A) の充放電が可能な高入出力形の大形電池である。その仕様を Table 3 に示す。

3.1 充放電性能

本システムは、回生吸収モードおよび電圧補償モードの 2 種類の充放電モードが可能である。前者は 10 ItA (600 A) の充電を、後者は 10 ItA (600 A) の放電を実施するものである。LIM60H 形リチウムイオン電池の 10 ItA (600A) 充電性能を Fig. 5 に示す。これは回生吸収モードを想定したものである。図より、この電池は、600 A の定電流で 126 秒間の充電が可能であることがわかる。その連続通電時間は仕様値 (30 秒間) の 4 倍以上であることから、十分な性能であるといえる。

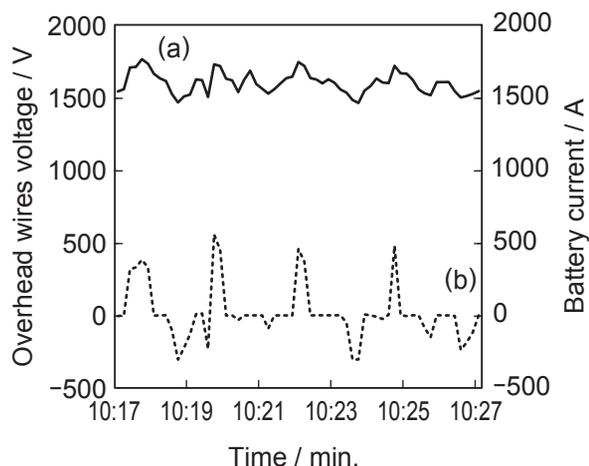


Fig. 4 Operation characteristics of battery current (a) and overhead wires voltage (b) for the energy storage system under the field test.

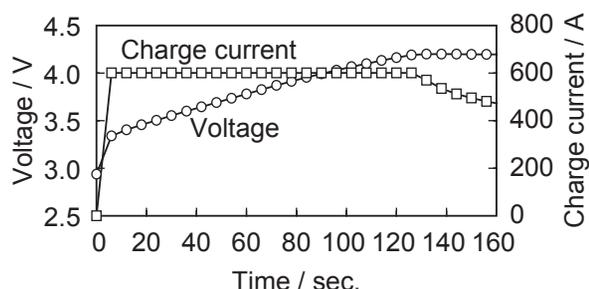


Fig. 5 10 ItA (600 A) charge performance of LIM60H type lithium-ion cell at 25 °C. Charge: 10 ItA (600 A) to 4.2 V for total 5 h at 25 °C.

つぎに、電圧補償モードを想定し、10 ItA (600 A) 放電性能を調査した。その結果を Fig. 6 に示す。図より、LIM60H 形電池は 600 A 定電流で 280 秒間の放電が可能であることがわかる。連続通電時間は仕様値 (30 秒間) の 9 倍以上であることから、十分な性能であるといえる。

さらに、本システムに LIM60H 形電池を組み込み、回生吸収モードでの充放電を 3 サイクル繰り返し実施した。その結果を Fig. 7 に示す。通電開始時の電池

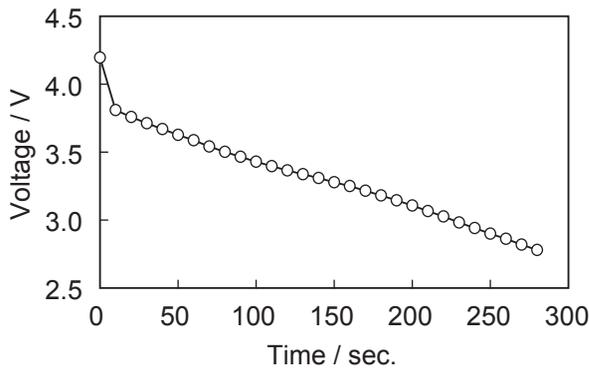


Fig. 6 10 *t*A (600 A) discharge performance of LIM60H lithium-ion cell at 25 °C.
Charge: 1 *t*A (60 A) to 4.2 V for total 5 h at 25 °C.
Discharge: 10 *t*A (600 A) to 2.75 V at 25 °C.

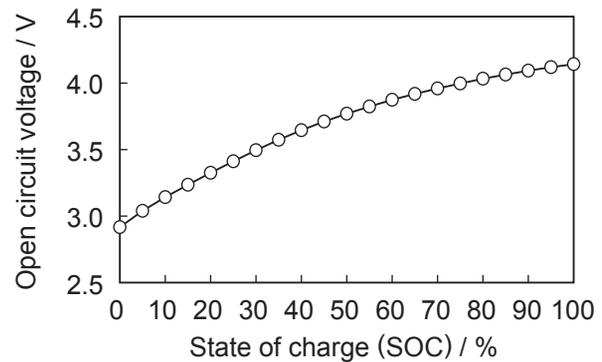


Fig. 8 Characteristics of the open circuit voltage for LIM60H type lithium-ion cell with the state of charge at 25 °C.

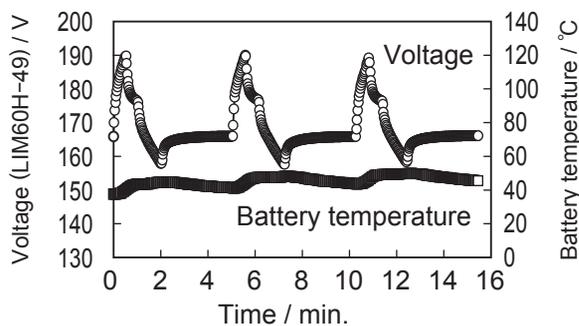


Fig. 7 Charge and discharge performance of LIM60H-49 lithium-ion battery at room temperature.
Charge: 10 *t*A (600 A) for 30 sec.
Rest: 30 sec.
Discharge: 5 *t*A (300 A) for 60 sec.
Rest: 180 sec.

充電レベルは20% SOCに設定している。LIM60H形電池は、回生吸収モードでの充放電中に終止電圧（充電側：4.2 V/セル，放電側：2.75 V/セル）に到達することなく、3サイクルのパターン充放電が可能であることが確認できる。また、放電後休止中の電圧はサイクル中にほとんど変化しないこともわかる。回生吸収モードは充放電の容量収支が等しくなるように設定しているので、LIM60H形電池が、10 *t*A ~ 5 *t*Aでの高率充放電でも、ほぼ100%の充放電効率（Ah効率）で運用できることを示している。

以上の結果から、LIM60H形電池は電力貯蔵用として、十分な充放電性能の電池であることがわかる。

3.2 電池電圧と充電レベルとの関係

電力貯蔵システムの運転は、回生吸収モードおよび

電圧補償モードの2種類のモードを選択し、さらにそれぞれのモードで充電、放電の電流値をモードに適した充電レベルに設定する必要がある。そこでLIM60H形電池の充電レベルと開路電圧の関係をFig. 8に示す。LIM60H形電池は充電レベルの変化にともなって開路電圧が連続的に変化する。つまり、LIM60H形電池は開路電圧の計測によって電池の充電レベルを推定できるので、開路電圧を用いた電池充電レベルの管理が容易であるといえる。

4 まとめ

今回、大形リチウムイオン電池を採用した電鉄用電力貯蔵システムを開発し、西日本旅客鉄道株式会社殿の営業路線でフィールドテストを実施した。その結果、リチウムイオン電池LIM60Hを搭載した本システムの、架線電圧変動にともなった電力吸収・放出動作を確認できた。今後、ハード面ではシステムの大容量化、ソフト面では既設の変電所との連携や充放電制御の最適化により一層効果をあげるためのシステムを完成させる予定である。また、広く普及できるようコストダウンに取り組み、地球温暖化防止への貢献を推進していく所存である。なお、装置は第1期のフィールドテストを終了し、場所を移して第2期のフィールドテスト継続中である。

最後に、装置開発にあたり、あらゆる面でご指導頂いた西日本旅客鉄道株式会社殿ならびに製作・試験で御協力頂いた東洋電機製造株式会社殿に深甚なる謝意を表す。