

路面電车用架線電圧補償装置の開発

Development of Overhead Line Voltage Compensator System for Streetcars

道永勝久* 松本貴文* 瀬山幸隆** 東直親*
作野敏郎* 山口雅英* 丸山真範*** 星吉輝***

Katsuhisa Michinaga Takafumi Matsumoto Yukitaka Seyama Naochika Higashi
Toshiro Sakuno Masahide Yamaguchi Masanori Maruyama Yoshiteru Hoshi

Abstract

The overhead line voltage compensation system consisting of lithium-ion battery module with air cooling fan and bidirectional converter has been installed in two streetcar stops in Kagoshima City for its practical use. This system has the function to support the operation of streetcars by both supplying energy from the battery during their acceleration in the case of lower voltage of overhead line and absorbing regenerated power during the deceleration for re-use of energy. The battery capable of high rate discharge for the supplement to lower overhead line voltage was verified to effectively suppress the temperature rise caused by heat generation accelerating battery degradation. This system is now effectively operative to compensate the overhead line voltage after passing approximately six months.

Key words: Overhead line voltage compensation; Lithium-ion battery; Streetcar; Cooling fan

1 まえがき

鹿児島市は、平成17年10月に策定したLRT（次世代形路面電車システム）整備計画に基づき、接続式超低床電車を導入するなど、人と環境にやさしい公共交通サービスの提供と輸送力の増強を推進している。

* (株)ジーエス・ユアサ パワーサプライ
電源システム生産本部

** 研究開発センター 第二開発部

*** 東洋電機製造株式会社 横浜製作所
〒236-0004 神奈川県横浜市金沢区福浦3-8

このような中、出力の大きいモータを採用した新形車両の増加によって、架線電圧の降下が生じることから、変電所の追設ではなく架線電圧補償装置を桜島栈橋通電停と中洲通電停の2箇所の新設した。以下この架線電圧補償装置の概要および性能について紹介する。

2 システム概要

本架線電圧補償装置の設置状況を Fig. 1, そのシステム構成を Fig. 2 に示す。

本装置は、双方向 DC/DC コンバータとリチウムイオン電池とで構成され、コンバータの一次側は断路器・



Fig. 1 An installation of overhead line voltage compensator system for streetcars.

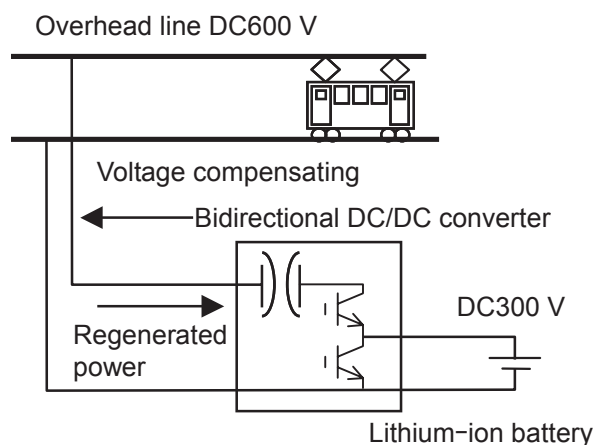


Fig. 2 System configuration of voltage compensation for streetcars.

高速度遮断器を介して架線に、また、二次側は遮断器を介してリチウムイオン電池に接続している。直流架線はDC600 Vで電圧されており、一方のリチウムイオン電池の電圧は公称電圧でDC302 Vである。このために、架線の電力を吸収する場合は一次側の架線電圧を降圧してリチウムイオン電池を充電し、架線に電力を放出する場合は、二次側のリチウムイオン電池電圧を昇圧して放電することにより双方向に電力のやりとりをおこなっている。Table 1にコンバータ、Table 2にリチウムイオン電池モジュールの仕様、Fig. 3にその外観を示す。リチウムイオン電池モジュールは14モジュール直列に接続して使用している。

3 動作概要と導入効果

本装置の主な動作と実測データによる導入効果につ

Table 1 Converter specifications of voltage compensation system.

Items	Specifications
System	IGBT Bidirectional DC/DC converter
Control	PWM control
Cooling system	Cooling fan
PWM frequency	720 Hz
Overhead wire nominal voltage	DC600 V
Overhead wire voltage range	DC360-750 V
Battery nominal voltage	DC302 V
Battery voltage range	DC244-344 V
Dimensions	W : 13000 mm D : 850 mm H : 1250 mm
Paint color	Light green

Table 2 Lithium-ion battery module specifications.

Items	Specifications
Battery type	LIM60H
Battery capacity	60 Ah
Nominal voltage	21.6 V (3.6 V × 6 cell)
Maximum current	600 A (10 C)
Cooling system	Fan
Dimensions	W : 220 mm D : 640 mm H : 150 mm
Mass	31 kg

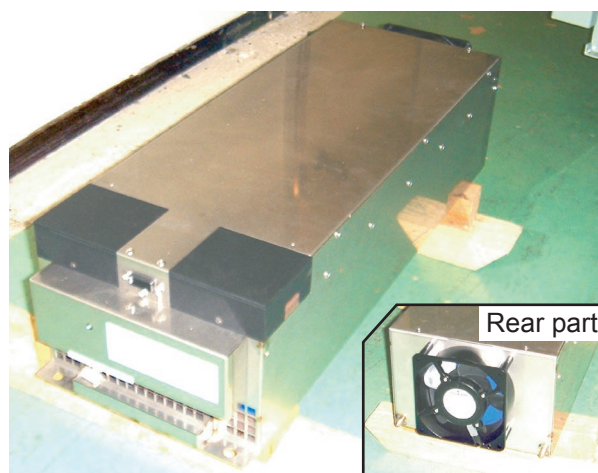


Fig. 3 External appearance of the battery module with air cooling fan for voltage compensation system.

いてのべる。

3.1 架線電圧補償制御

この制御は本装置の主動作である。すなわち、本装置近傍に力行しながら走行する電車があり、架線電圧が低下した場合、低下電圧に応じてリチウムイオン電池から電力を放出し、架線電圧を補償する。また、回

生しながら走行する電車があり、架線電圧が上昇した場合、上昇した電圧に応じてリチウムイオン電池を充電して、回生エネルギーを蓄える。

Fig. 4 に本装置の動作制御図を示す。本装置は架線電圧に応じた電流制御をおこなっており、その電圧がDC470 V まで低下すると電池から放電を開始する。放電電流は架線電圧に応じて調整しているが、DC450 V 以下では 420 A の定電流としている。さらに電圧が低下した場合 DC400 V で装置を停止する。逆に、架線電圧が DC700 V まで上昇すると電池に充電を開始する。充電電流は架線電圧に応じて調整しているが、DC720 V 以上では 420 A の定電流としている。

3.2 電池充電量調整制御

電圧補償制御のみをおこなうと、リチウムイオン電池の充電状態 (SOC, State of Charge) が低くなり、必要な場合に架線電圧の補償ができなくなる。逆に回生電力吸収制御のみをおこなっていると SOC が高くなり、架線電圧が上昇しても電力を吸収できなくなる。本装置では架線電圧が通常範囲にある場合、その電圧に大きな影響を与えない程度の電流で SOC を一定範囲内に調整している。本制御の動作例を Fig. 5

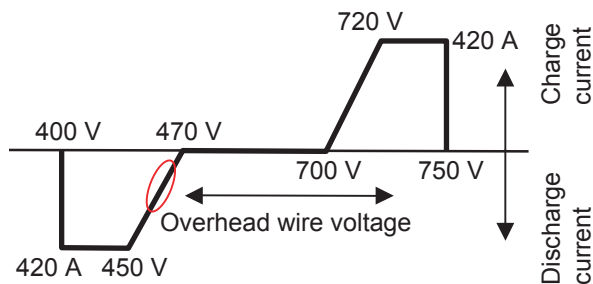


Fig. 4 Control operation chart of voltage compensation system for streetcars.

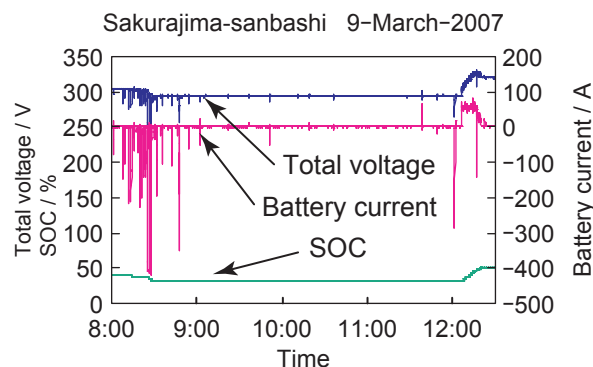


Fig. 5 Representative SOC adjustment control in voltage compensation system for streetcars.

に示す。時間が 8:00 ~ 9:00 の間に電池放電が継続し、SOC が 40% まで低下しているが、これを補うために 12:00 より SOC 調整充電がおこなわれている。調整充電は SOC 50% を目標に最大 1 C (60 A) にておこなわれている。

3.3 導入効果の検証

架線電圧補償装置の停止時の動作例を Fig. 6 に示す。午前 8 時 14 分には、架線電圧が DC385 V となっている。この架線電圧が 450 V 未満になると路面電車の速度低下といった影響がでる可能性があることから、その運行に影響がでることになる。つぎに、運転時の動作例を Fig. 7 に示す。

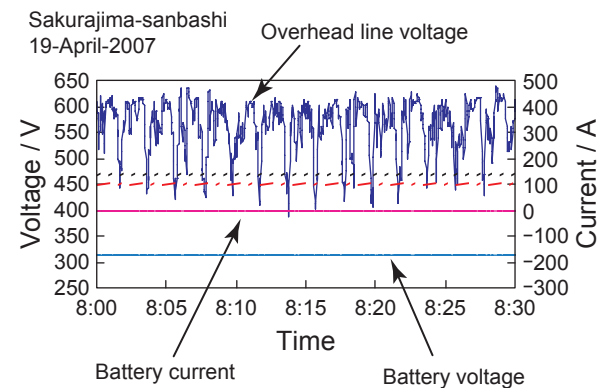


Fig. 6 Representative operation chart at the function stoppage of voltage compensation system for streetcars.

..... Setting voltage of installed discharge
 - - - - - Setting voltage of constant discharge

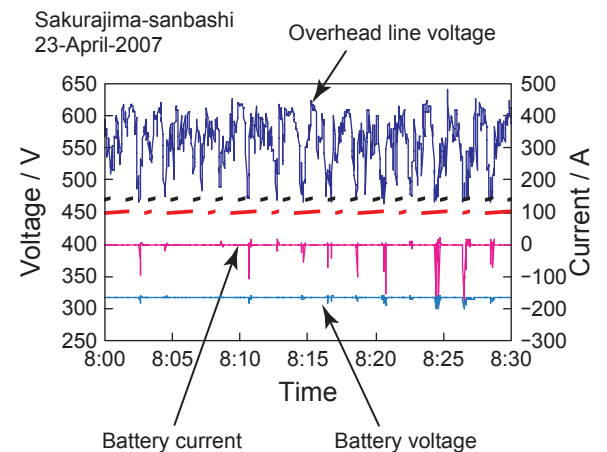


Fig. 7 Representative operation chart at the function working of voltage compensation system for streetcars.

..... Setting voltage of installed discharge
 - - - - - Setting voltage of constant discharge

一方、装置運転時 (Fig. 7) では、架線電圧が DC450 V を下回ることはなく、電池から架線に最大 200 A 程度の電流が供給されていることがわかる。このときの動作は Fig. 4 における赤丸で囲んだ部分に相当する。これらのデータより、本装置が架線電圧を補償し、良好に動作しているといえる。

4 リチウムイオン電池の保護動作

リチウムイオン電池の性能を十分に引き出すためには、規定の動作範囲内での使用が不可欠となる。そのため、本システムでは LIM60H 電池の保護を実施している。ここでは、その概要について解説する。

4.1 リチウムイオン電池に必要な保護

リチウムイオン電池に対して必要な保護動作を Fig. 8 に示す。電池に対する保護は、電池電圧に対するもの (過充電保護および過放電保護) と温度 (低温および高温に対する保護) に対するものの 2 種類である。

4.2 架線電圧補償装置における保護動作

架線電圧補償装置における保護動作の概要を Fig. 9 に示す。CS (Cell Sensor) と呼ばれる電池モジュールに内蔵された監視基板で全セルの電圧を測定しており、RS 485 通信により BM (Battery Monitor) と呼ばれる管理装置にそれらの情報が集められる。

BM では各セル毎の電圧より、過充電保護に対しては「過充電予告」「過充電異常」、過放電保護に関しては「過放電予告」「過放電異常」のそれぞれ二段階の信号をだし、コンバータを待機もしくは停止状態にしている。また、コンバータでは、BM での電池監視とは独立して過電圧停止をかけており、BM での検出ができなかった場合や BM 自身が機能を停止している場合にも自身で保護動作がかかるようになっている。さらに、保護動作そのものではないが、それに準ずる動作として、上限電圧、下限電圧が設定されており、上限電圧に達した場合は充電電流を絞り込み、下限電圧に達した場合は放電電流を絞り込むようにしてい

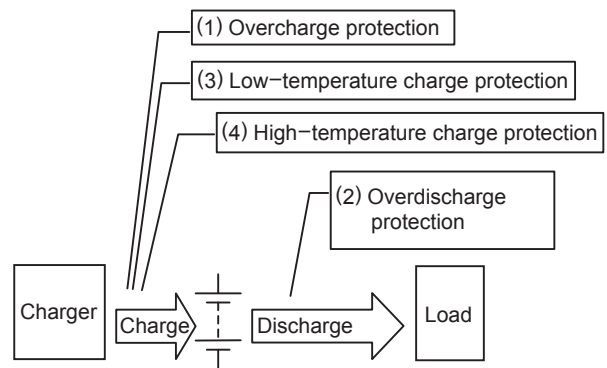


Fig. 8 Required protections for lithium-ion battery.

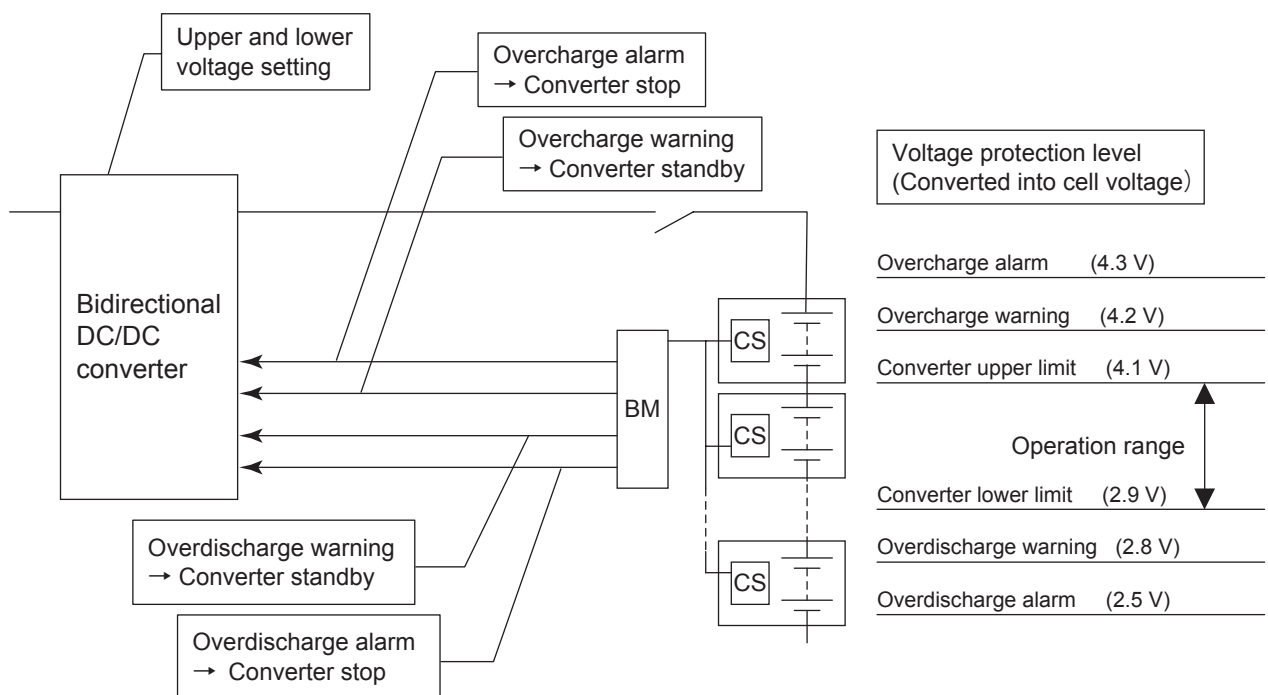


Fig. 9 Outline of protection operation in the voltage compensation system for streetcars.

る。したがって、通常は Fig. 9 に示すように 2.9 ~ 4.1 V の範囲で動作させ、過充電や過放電にならないようにしている。しかしながら、実際にはコンバータの制御はトータル電圧でおこなわれているため、各セル電圧にばらつきが発生しているとセルによっては、その範囲から外れるものがでてくる可能性がある。その際には保護動作が働き、コンバータ待機もしくは、停止動作をおこなう。

5 風冷モジュールの冷却性能

5.1 電池の温度と寿命

電池の寿命は温度により大きく変動する。Fig. 10 は LIM60H と同シリーズのリチウムイオン電池 LIM30H の保存寿命特性である。この図は容量との相関であるために、本装置での寿命と直接的に関係するものではないが、温度によって大きく劣化度合いが異なることがわかる。

5.2 風冷モジュールの採用と冷却効果

本装置では、高率の充放電となるために、発熱による温度上昇が大きくなる。そのために、風冷モジュールを採用することにより、電池の温度上昇を低減している。その効果を確認するため、Table 3 に示す条件にて風冷モジュールの充放電試験をおこない、温度上昇を測定した。温度上昇測定はあらかじめ温度上昇が

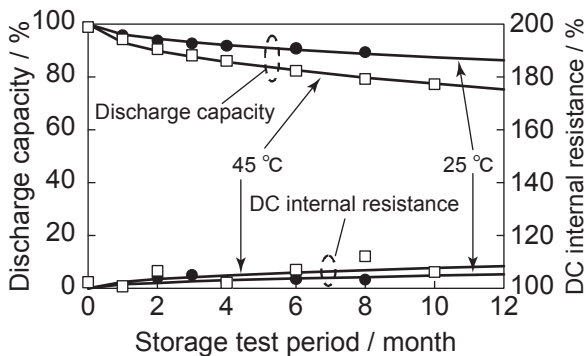


Fig. 10 Calendar life performance for LIM30H type lithium-ion battery.

Table 3 Charge and discharge test condition of LIM60 type lithium-ion battery module with air cooling fan.

Pattern	Charge 30 seconds-, Discharge 30 seconds, and repeat
Cycle number	300 times (5 hours)
Thermostatic bath setting	10, 25, 40 °C

最も大きいモジュール内の場所を調査し、Fig. 11 に示す位置とした。また、電池は熱容量が大きいために、温度が平衡するまで5時間以上の通電が必要になる。したがって、充電あるいは放電のみの動作では、上限電圧・下限電圧に達するために、充放電は充電30秒放電30秒のくり返しとした。

その試験結果を Fig. 12 に示す。下側の3本の曲線がそれぞれ周囲温度を変えて測定した風冷モジュールの温度上昇である。なお、冷却ファンを停止させた状態での測定も通電電流1点でおこなっている。図から、冷却ファンを停止させた状態では、通電電流157 Aにて37.5 °Cの温度上昇となっており、風冷による冷却効果が大きいことがわかる。また、図より環境温度

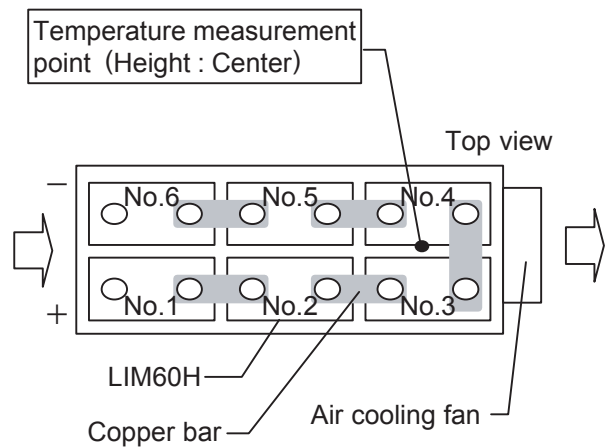


Fig. 11 Temperature measurement point of LIM60 type lithium-ion battery module with air cooling fan.

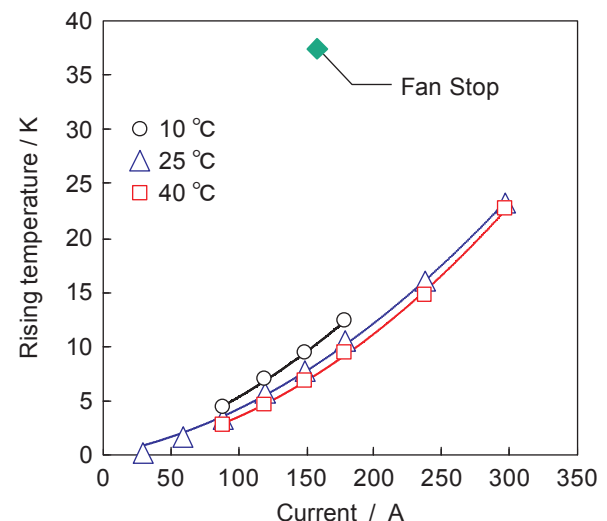


Fig. 12 Rising temperature of LIM60 type lithium-ion battery module with air cooling fan.

が低いほど温度上昇が大きくなることがわかる。これは電池の内部抵抗が低温時に大きくなることによるものと考えられる。これらの特性から、使用環境による電池温度を算出できる。例えば、気温 40℃の使用環境で通電電流が 150 A である場合には、図より、温度上昇は 7℃であるので電池温度は最高 47℃になることがわかる。これによって、電池寿命の推定が可能である。

6 まとめ

以上、今回開発した鉄道用架線電圧補償装置についてリチウムイオン電池部分を中心に報告した。本装置により路面電車の架線電圧低下に対する電圧補償を実

現し、十分な電圧補償効果がでていることが確認された。また、運転開始後約半年が経過したが、トラブルもなく稼働している。

最後に快くフィールドデータ収集に対して許可いただいた鹿児島市交通局殿に深く謝意を表する。

文 献

- 1) 石井順, *GS Yuasa Technical Report*, **3** (2), 1 (2006).
- 2) 梅田繁樹, 中村悦章, 石井順, 平成 17 年電気学会産業応用部門大会, 3-43 (2005).
- 3) 瀬山幸隆, 岡崎賢二, 東直親, 作野敏郎, *GS Yuasa Technical Report*, **2** (2), 25 (2005).