

リチウムイオンキャパシタ用電圧監視制御装置

Voltage Monitoring and Control Units for Lithium-Ion Capacitors

中條政重* Masashige Nakajo 齊藤 正* Tadashi Saito

天野雅彦** Masahiko Amano 濱 良樹*** Yoshiki Hama 今井伸治**** Shinji Imai

大電流の急速充放電が可能であり、長寿命の蓄電デバイスとしてリチウムイオンキャパシタが注目されている。システム化に際しては、リチウムイオン電池と同様にセル電圧の監視制御が必要となるが、過充電に対する安全性が高く、電圧ばらつきが小さいといった特長を利用し、適正にリチウムイオンキャパシタを監視制御することにより低コスト化を図ることができた。産業用の標準電圧である 24 V系、48 V系に対応する汎用性の高い 16 セルモジュール用の電圧監視制御基板を開発し、無人搬送車、特装車などへの適用を図った。さらに回生電力吸収装置や瞬低対策電源など、大容量多直列多並列システムへも展開中である。Lithium-ion capacitors (LCAP) come to be widely noticed as energy storage devices with long life and high-power charge/discharge capability. As same as for lithium-ion battery (LIB) systems, monitoring and control of cell voltage are necessary for LCAP systems, whose characteristics such as higher safety in overcharge and smaller fluctuation of cell voltage enable to realize simpler and lower cost systems. Versatile basic unit of 16 cells LCAP module developed for 24V or 48V monitoring and control systems, has being applied to automated guided vehicles, specifically equipped vehicles and so on. Furthermore, it is able to be applied to high-voltage and large-capacity storage systems such as regenerative braking energy storage for railway system, voltage sag mitigation device and so on.

〔1〕 緒 言

リチウムイオンキャパシタ（以下、LCAPと略す）は、電気二重層キャパシタ（以下、EDLCと略す）の正極とリチウムイオン電池（以下、LIBと略す）の負極を組み合わせた蓄電デバイスである¹⁾。EDLCの約3倍のエネルギー密度を有し、大電流の充放電が可能、長寿命、高耐熱、高安全などの特長を持つ。これらの特長を活かした用途として、無人搬送車、瞬低対策電源²⁾³⁾、鉄道電力回生、スマートグリッドなどへの適用が始まっている。

新神戸電機(株)は、日立化成工業(株)、日立エーアイシー(株)

と共に円筒型 LCAP の開発に取り組み、試作による基本性能の確立を経て、現在は量産体制に移行しつつある。

LCAPを多直列接続して使用する場合、LIBと同様にセル電圧の監視制御が必要となる。これまで、LIB用の電圧監視制御装置を応用して開発を進めてきたが、LIBに比べて過充電に対する安全性が格段に高い、電圧ばらつきの影響が少ないといった性質を利用することで、LCAPに適正な監視制御をすることにより低コスト化を図ることができる。

本報告では、開発した低コスト型の電圧監視制御装置の概要と、その適用事例について述べる。

* (株)日立超 LSI システムズ ** Li 事業本部 SE 事業統括部 *** Li 事業本部 Li 事業統括部 **** (株)日立製作所日立研究所

[2] LCAP の特性

LCAP は、正極に EDLC と同じ活性炭、負極に LIB と同じリチウムイオン吸蔵可能な炭素材料を用いた蓄電デバイスである。動作原理を図1に示す¹⁾。あらかじめ負極にリチウムを吸蔵させることで、初期 3.0 V の電圧を持ち、充電側 3.8V、放電側 2.2 V と ± 0.8 V の電圧範囲で動作する。

電圧 0 ~ 2.5 V で動作する EDLC と比較すると、動作電圧が高いためエネルギー密度が高くなり、かつ正極の負荷が小さいことから寿命の点で有利となる。

また、紙セパレータを用いていることや、電解液の引火点が 130℃ 以上であることから、高温にも強く、80℃ の環境でも 1000 時間以上動作可能である。

安全性については、表1に示す安全性試験結果¹⁾ からわかるように、全ての試験項目において、破裂、発火が起こらないことが確認できている。特に過充電に対する安全性が高い。LIB の場合、過充電領域において反応が加速的に進む熱暴走状態となり、破裂、発火に至る可能性があるのに対して、LCAP の場合は満充電容量の 2.5 倍まで充電しても開裂弁の動作などが起こらず、熱暴走の危険性がないことが確認できている¹⁾。

[3] LCAP 用電圧監視制御装置の考え方

電圧監視制御装置の主な機能は、過充電・過放電の検知、異常セルの検知、セル電圧均等化の三つである。これらの機能の実現方法について、LIB の場合と比較して説明する。

3.1 過充電・過放電の検知

過充電・過放電の検知は、セルの運用電圧範囲を超えないように監視する機能で、安全性の確保と劣化防止が主な目的である。

LIB の場合、過充電により熱暴走に至る可能性があるため、過充電領域に絶対入らないよう、セル電圧を厳重に監視する必要がある。直列に接続された電池セルについては、電圧ばらつきの可能性があるため、総電圧を監視するだけでは不十分で、セル1本ごとに電圧を計測して監視する必要がある。例えば図2に示すようなセルコントローラ（以下、セルコンと略す）回路を用いて、セル1本ごとの電圧を監視する。そのための専用のセルコンも開発されている⁴⁾。また、万一 IC が故障した場合を想定して、電圧計測の冗長系を持たせ

表1 LCAP の安全性試験結果¹⁾

Table 1 Safety test result of LCAP

試験名称	条件	結果	備考
ショート	外部短絡	安全弁作動、破裂・発火・発煙無し、最高温度 100℃	0.01mΩ のシャント抵抗で電流を測定
圧壊	満充電後直径の 1/2 まで	安全弁作動、破裂・発火無し、最高温度 125℃	150mmφ, 4mm/秒
釘刺し	満充電後直径の 1/2 まで	破裂・発火無し、少量の発煙、最高温度 120℃	5mmφ, 15mm/秒
過充電	2.2V から容量の 250% を充電	60 分経過観察、変化無し、最高温度 31.5℃	充電電流 10A
過放電	3.8V から容量の 250% を放電	60 分経過観察、変化無し、最高温度 39℃	放電電流 10A
大電流連続充電	100A 連続充電 25 分	安全弁作動、破裂・発火無し、最高温度 200℃	満充電量の 100 倍充電
大電流連続放電	100A 連続放電 25 分	安全弁作動、破裂・発火無し、最高温度 360℃	大型電池を逆極性に繋いで強制放電

※本試験は容量 1000F 品で実施

ることも一般に行われている。

これに対して LCAP においては、過充電にて熱暴走に至る可能性が低く、図3に示すように、満充電容量の 2.5 倍 (SOC = 250%) まで充電しても、何の変化もないことが確認できている¹⁾。そこで、LCAP についてはセル1本ごとの電圧を計測する必要はなく、直列全体の総電圧だけで過充電、過放電の監視をすればよいと判断できる。また、冗長系の必要もないと考えられる。セル1本ごとの電圧を計測しないのであれば、専用のセルコンを用いる必要はなく、汎用のマイクロコンピュータ（以下、マイコンと略す）で構成することが可能となる。

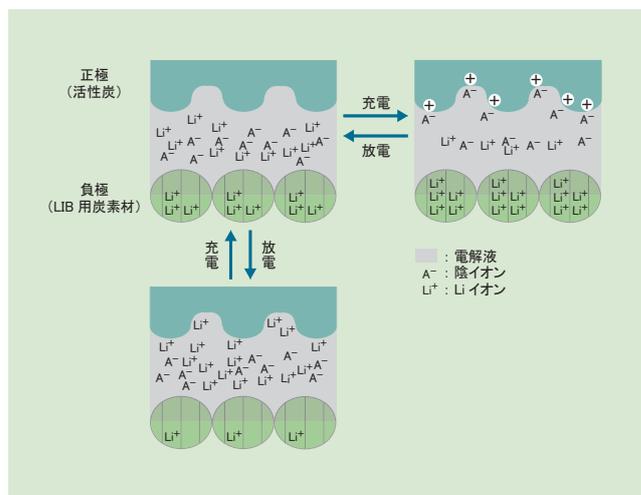


図1 LCAP の充放電の原理¹⁾

Fig.1 Charge/discharge mechanism of LCAP

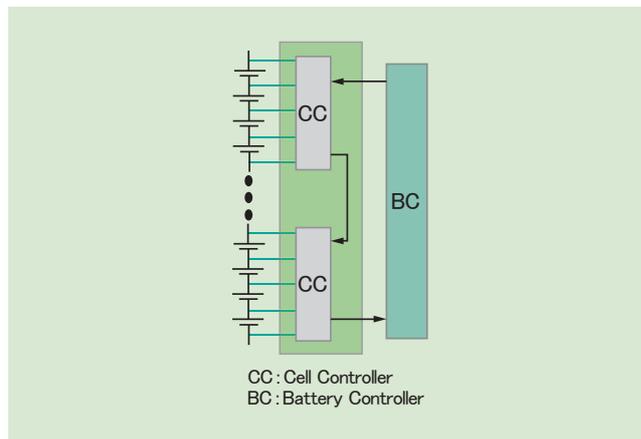


図2 セルコン回路の例

Fig.2 Example of cell controller circuit for LIB

3.2 異常セルの検知

セルの微小短絡、容量低下、抵抗上昇などが発生した場合に監視制御装置が異常を検知する機能である。異常なセルが混在していると、他のセルとの電圧差が大きくなるため、結果として全体の運用電圧範囲が狭くなってしまったり、正常セルの劣化を早めてしまったりすることになる。

異常なセルは、セル電圧を計測して比較することにより判定できるので、LIB の場合は全てのセル電圧を計測してセル電圧の異常を検知している。

一方、LCAP の異常セル発生頻度は低いことから、セル1本ごとではなく、数直列分の電圧をまとめて計測して比較することで異常を検知できると考えられる。LCAP は図4に示すような4セルユニットで構成する用途が多いため、4セル単位で電圧を計測して比較する方式をとることにした。セル1本ごとに電圧を計測する場合に比べて、計測点を4分の1に減らすことができる。

3.3 セル電圧均等化

直列接続されたセルには常に同じ充放電電流が流れるが、自己放電特性のばらつきやセル容量のばらつきによって、セル電圧にばらつきが生じてしまう。セル電圧のばらつきにより、運用電圧範囲が狭くなったり、あるいは劣化のばらつきが生じたりする可能性がある。

セル電圧の均等化にはいくつか方式があるが、図5に示す

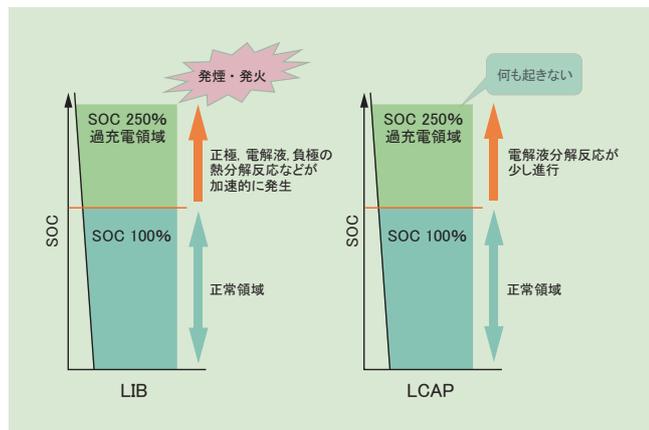


図3 過充電安全性の比較
Fig.3 Comparison of overcharge safety

ように、抵抗バイパス回路により放電する方式が最も一般的である⁵⁾。

LIB の場合、例えば、セル1本ごとに電圧目標値との偏差に応じてバイパス回路の導通時間を定め、セル電圧を目標値まで低下させることによりセル電圧の均等化を図っている(セル個別制御方式)。

一方、LCAP においては、セル個別制御方式ではなく、全部のセルに同時に抵抗を接続するセル一括制御方式をとることとした。これは、電圧の高いセルほど抵抗による放電電流が大きくなることを利用して、徐々に電圧を均等化する方法である。

図6に電圧均等化のシミュレーション例を示す。セル個別制御方式に比べると、セル一括制御方式の方がセル電圧の

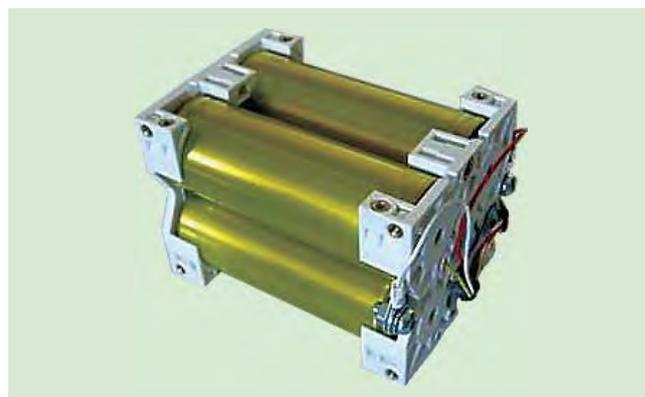


図4 4セルユニットの外観
Fig.4 Appearance of 4 cells unit

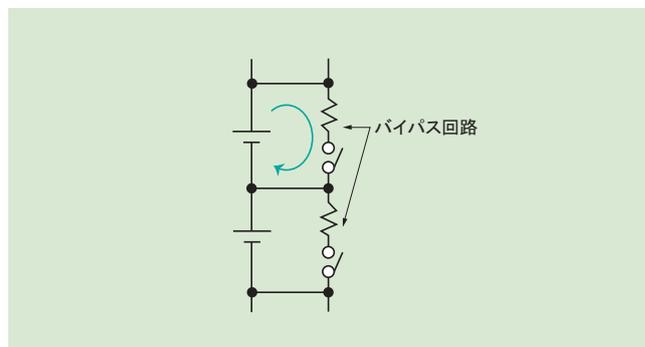


図5 抵抗バイパス回路による電圧均等化
Fig.5 Voltage balancing by by-pass circuit resistance

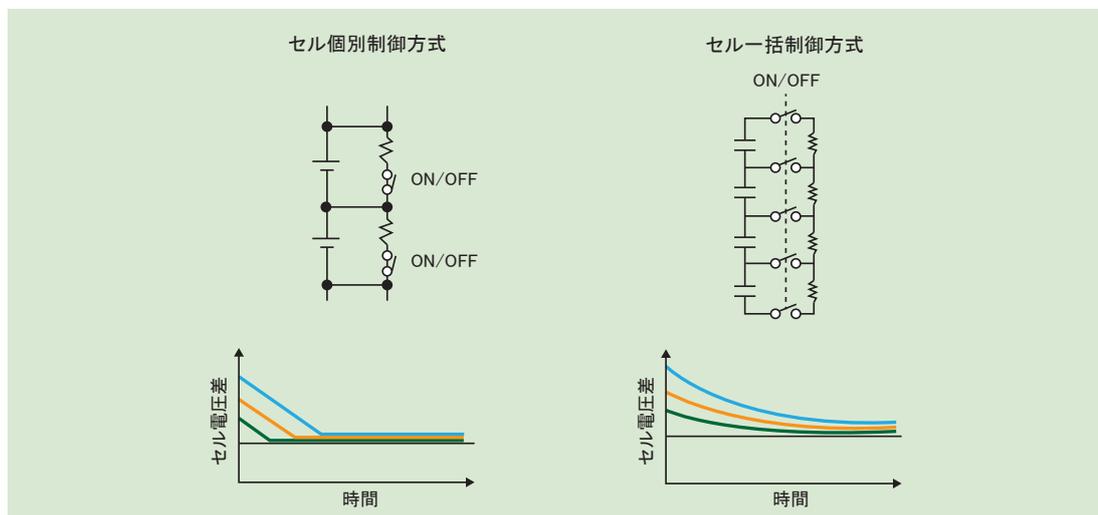


図6 電圧均等化のシミュレーション例
Fig.6 Example of voltage balancing simulation

均等化に要する時間が長くなるが、電圧均等化の制御が簡便という利点がある。

なお、セル一括制御方式の場合、バイパス回路を導通している時間が長くなるため、抵抗放電による損失も大きくなるが、大きめの抵抗値を選定してバイパス電流を小さく抑えるよう工夫している。

以上の検討結果のまとめを表2に示す。LIB に比べて簡易な監視制御方式とすることにより、専用のセルコンを用いることなく汎用のマイコンのみで監視制御装置を構成でき、低コスト化を図ることができる。

[4] 監視制御基板の開発

4.1 16セルモジュール用監視制御基板

前章で述べたLCAP用電圧監視制御の検討結果をもとに、16セルモジュール用の監視制御基板を開発した。16セルモジュールは、図4の4セルユニット4個分から成り、産業用の標準電圧である48V系に対応するものである。8直列2並列構成とすることにより、24V系にも対応できる。

低コストを実現するため、専用のセルコンを用いず、汎用のマイコンのみで構成した。マイコンには、アナログ-デジタル（以下、A/Dと略す）変換器内蔵で低消費電流の特長を有するH8/38086R（ルネサスエレクトロニクス㈱製）を選定した。

A/D変換器には、表3に示すように逐次比較方式と $\Delta\Sigma$ 方式の2種類がある。LCAPの電圧監視には高精度が必要であるが、速度は遅くてよいため、 $\Delta\Sigma$ 方式を採用した。

開発した16セルモジュール用監視制御基板の回路ブロック及び外観を図7、図8に、基板の仕様を表4に示す。

電圧均等化には前述したセル一括制御方式を用いるが、消費電流の低減やセル過放電の防止のため、基板電源がONの場合のみ抵抗を接続するようにした。基板の電源はユーザーシステム側のスイッチで制御可能とした。

過充電、過放電の監視と異常セルの検知には、総電圧と4セルモジュールごとの電圧を切り換えて、マイコンのA/D変換器にて測定する。また、サーミスタをLCAP表面に貼付し、A/D変換器で温度を測定して監視する機能も設けた。

表3 A/D変換方式の比較

Table 3 Comparison of A/D conversion method between $\Delta\Sigma$ and successive approximation

項目	精度	速度	用途	
			測定系	制御系
逐次比較方式	低い	速い	×	○
$\Delta\Sigma$ 方式	高い	遅い	○	×

表2 電圧監視制御方式の比較

Table 2 Comparison of voltage monitoring and control system between LACP and LIB

項目	LIB	LCAP
過充電・過放電検出	セル電圧測定(冗長) + 総電圧測定	総電圧測定
異常セル検出	各セル比較	4セル毎比較
電圧均等化	セル個別制御方式	セル一括制御方式
制御IC	専用セルコン + 汎用マイコン	汎用マイコン

測定した電圧、温度情報によりLCAPの状態を判定し、その結果を基板に実装したLEDに表示するとともに、ユーザーシステム側に状態出力できるようにした。

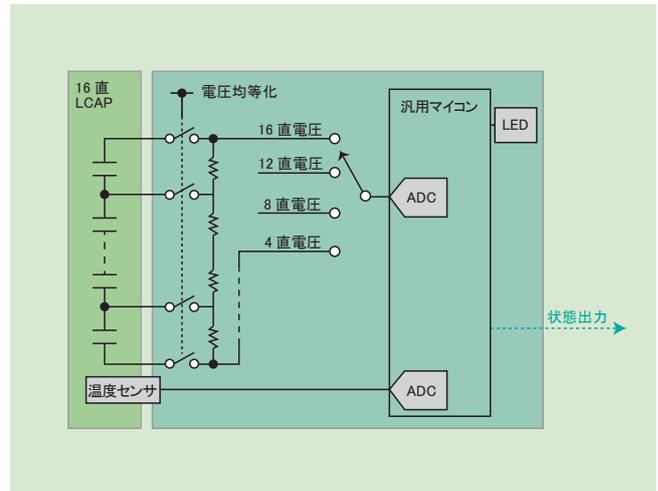


図7 16セルモジュール用監視制御基板の回路ブロック

Fig.7 Block diagram of monitoring and control board for 16 cells module

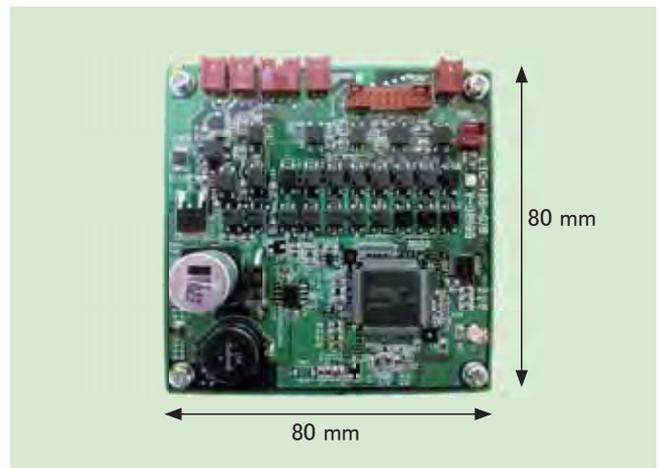


図8 16セルモジュール用監視制御基板の外観

Fig.8 Appearance of monitoring and control board for 16 cells module

表4 16セルモジュール用監視制御基板の仕様

Table 4 Specifications of monitoring and control board for 16 cells module

入力電圧	17.6 ~ 60.8 V
温度	-15 ~ 80 °C
マイコン	H8/38086R (ルネサスエレクトロニクス㈱製)
マイコン内蔵 A/D 変換器	分解能: 14 bit
	変換方式: $\Delta\Sigma$ 方式
	変換速度: 32 μ s
寸法	80mm x 80 mm
外部インターフェース	オープンコレクタ出力, シリアル通信

4.2 多直列システムへの対応

16 直列以上の多直列システムについては、開発した監視制御基板を複数枚接続することで対応できるようにした。

図9に複数接続の例を示す。基板間の接続にはフォトカプラを使用し、送受信データには単純な3ビットのコードを用いた。複数基板をデージーチェーン方式（数珠つなぎ）で接続し、最後に情報を受け取った基板が、ユーザシステムに対して状態出力する。シリアル通信や CAN（Controller Area Network）通信など一般的な通信方式を用いる場合に比べて、低コストで情報伝達が実現できる。

4.3 外部リレー制御

無人搬送車（AGV：Automated Guided Vehicle）に LCAP を適用する場合、待機状態が長く続いて LCAP の電力を使い切ってしまう、充電器のある場所までたどり着けないといった事象が発生する可能性がある。そのため、LCAP のバックアップ用に鉛蓄電池などを組み合わせることがある。

図 10 に鉛蓄電池によるバックアップの構成例を示す。常

時は LCAP から電力を供給し、LCAP の電圧がある一定値以下に下がると、リレーを制御して鉛蓄電池からも電力供給ができるようにする。充電の際には、LCAP と鉛蓄電池の両方がうまく充電できるようにリレーを制御する。

開発した監視制御基板では、このような外部リレーを最大4系統まで制御できる。

〔5〕適用事例

5.1 無人搬送車

無人搬送車への適用を主目的に、LCAP16 セルから成る標準モジュールを開発した。16 直列1並列（48 V系）、または8直列2並列（24 V系）として使用可能である。

開発した 16 セルモジュールの外観を図 11 に示す。監視制御基板は、LCAP セルとともに筐体内部に収納されている。

5.2 多直列モジュール

建設機械や塵芥車などの特装車には、より高い電圧が必要となるため、LCAP を多直列に接続し、監視制御基板も複数接続する必要がある。一例として、96 セルモジュールの外観を図 12 に示す。

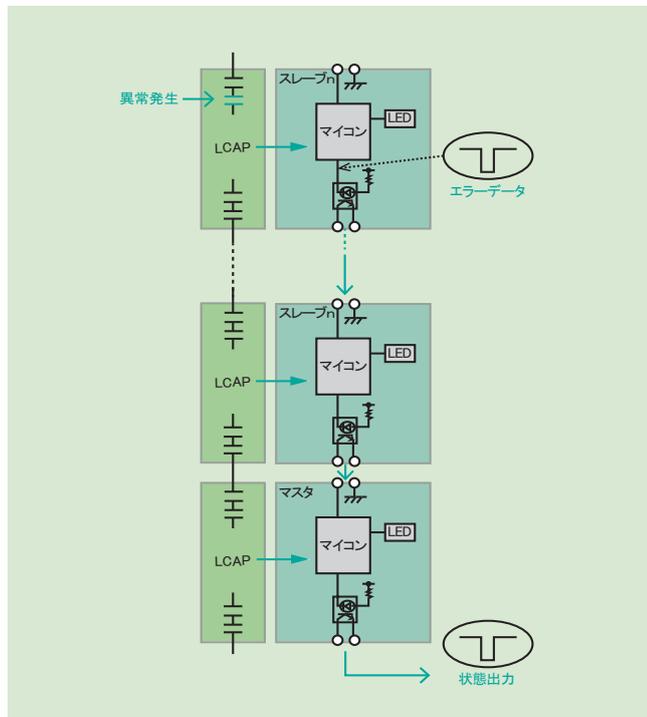


図9 監視制御基板の複数接続例

Fig.9 Multiple connection example of monitoring and control boards

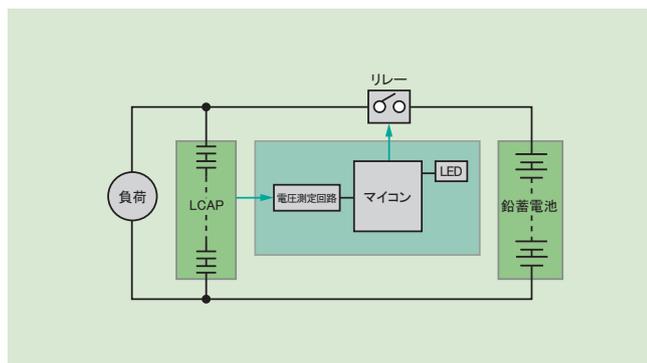


図 10 鉛蓄電池によるバックアップの構成例

Fig.10 Example of backup method by lead-acid batteries



図 11 16 セルモジュールの外観

Fig.11 Appearance of 16 cells module



図 12 96 セルモジュールの外観

Fig.12 Appearance of 96 cells module

車両に搭載する場合には、車両のイグニッション信号と連動して監視制御基板の電源を ON/OFF させる機能や、状態出力により LCAP の状態が運転席から監視できる機能を実現している。

回生電力吸収装置や瞬低対策電源など、高電圧大容量が要求される分野においては、100 セル以上の多直列化と多並列化が必要となる。基本的には開発した監視制御基板の組み合わせで実現が可能であるが、LIB におけるバッテリーコントロールユニットのような、統括的な監視制御装置も今後開発していく必要がある。

〔6〕結 言

- (1) 過充電に対する安全性が高いリチウムイオンキャパシタの特長を活かし、低コスト型の電圧監視制御装置を開発した。
- (2) 汎用性の高い 16 セルモジュール用監視制御基板を開発し、無人搬送車や特装車などに適用した。
- (3) 複数基板をデイジーチェーン接続することで、多直列モジュールへの対応も可能とした。

〔参考文献〕

- 1) 上原秀秋, 他: “高信頼性円筒型リチウムイオンキャパシタ”, 新神戸テクニカルレポート, 20, p.9 (2010).
- 2) 依田和之, 他: “リチウムイオンキャパシタ適用高圧瞬低対策装置「UPS8000H」”, 富士時報, 83-2, p.111 (2010).
- 3) 山本隆之: “リチウムイオンキャパシタ式瞬時電圧低下補償装置の開発”, 電気学会金属産業研究会資料, MID-10, p.11 (2010).
- 4) 工藤彰彦, 他: “リチウムイオン電池用 IC 化セルコントローラの開発”, 新神戸テクニカルレポート, 16, p.16 (2006).
- 5) 江守昭彦, 他: “HEV 用リチウムイオン二次電池制御回路の開発”, 電子情報通信学会論文誌 B, J91-B-1, p.104 (2008).