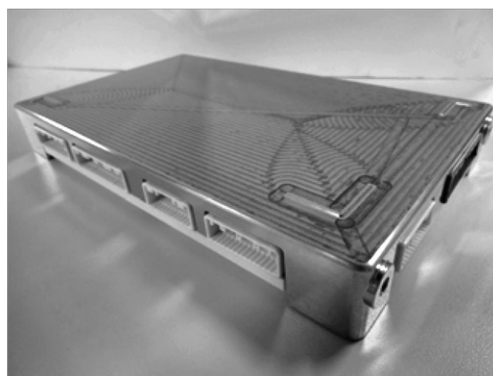
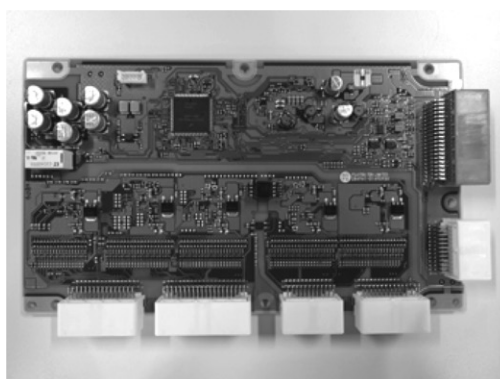


バッテリーマネージメントシステムの開発

Development of Battery Management System

藤田 嘉和	Yoshikazu FUJITA
廣瀬 育之	Yasuyuki HIROSE
加藤 優典	Yusuke KATO
渡辺 雄大	Takahiro WATANABE



要 旨

高効率でエネルギー密度の高いリチウムイオン電池は、モバイル電子機器や電気自動車へ採用されてきたが、さらに小型モビリティ（電動バイク、ゴルフカート等）や家庭用蓄電池、トラック／バス、産業機器といった多様な用途へ拡がりつつある。しかし、リチウムイオン電池は使い方を誤ると発火・感電といった危険があり、高効率なリチウムイオン電池を安全かつ有効に使う為にはバッテリーマネージメントシステム（BMS）による電池残量推定、異常検知の技術が重要になる。当社では、多様で幅広い用途に展開が可能な標準BMS PF(プラットフォーム)を開発した。本稿ではその開発コンセプト、安全設計技術、高精度電池残量推定技術について紹介する。

Abstract

Due to their high efficiency and high energy density, lithium-ion batteries have been adopted for mobile electronic devices and electric vehicles. They have been increasingly used further for various applications, such as small mobility vehicles (electric motorcycles, golf carts, etc.), stationary batteries for HEMS (Home Energy Management System), trucks/buses and industrial machinery. However, they have risks of fire hazard and electric shock if being used incorrectly. In order to use the highly efficient lithium-ion batteries safely and effectively, a battery management system (BMS) is needed. Among the BMS, technologies of the battery capacity estimation and the malfunction detection are important.

FUJITSU TEN has developed a universal BMS PF (platform) that can be used for a variety of applications. This paper elaborates the development concept, the safety design technology and the highly-accurate battery capacity estimation technology of the universal BMS PF.

1

はじめに

二次電池(充電可能な電池)の中でエネルギー密度の高いリチウムイオン電池は、環境意識の高まりと技術開発による小型高容量化・コストダウンにより2015年～2025年にわたり約20%/年で市場拡大が見込まれている。リチウムイオン電池は1990年代より小型軽量、メモリ効果が無い、自己放電が少ないといった特徴から、携帯電話やノートパソコンなどのモバイル製品用電源として採用されてきたが、2009年からはEV車両やハイブリッド車両に搭載され拡大を続けてきた。

今後はさらに用途が拡大し、

- ・ 夜間電力や太陽光発電電力を蓄える家庭用蓄電池
- ・ 建設機械や装置用電源といった産業機器
- ・ 電動バイクや電動カートといった小型モビリティ
- ・ 大型バス、トラックの商用車

といった様々な分野への採用が期待される。

しかし、リチウムイオン電池は取り扱いを誤ると発煙発火や感電といった重大な問題を起こす可能性があり、安全性を確保する為にバッテリーマネジメントシステム(以降BMS)が重要となる。

BMSの役割は、

- ・ 過電圧、過昇温、漏電等の異常検知
- ・ 各温度、充放電環境下での電池残量推定

であり、この機能によりリチウムイオン電池の大きなエネルギー密度を安全に活用する事が可能になる。

電動車両の機能ブロック図を図1に示す。

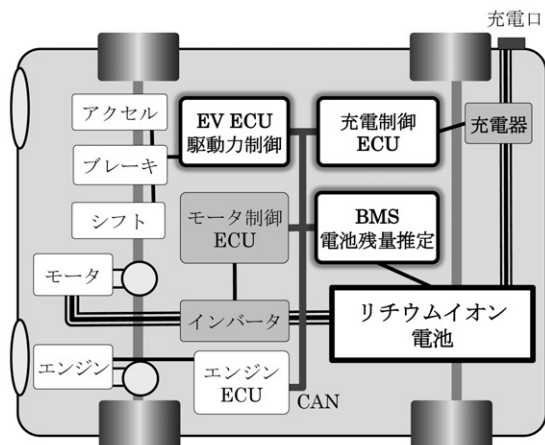


図1 電動車両のブロック図

BMSによりリチウムイオン電池の電池残量の推定を行い、その値と電池温度情報によってEV ECUがモーターとの間の電力供給(放電)量、回生(充電)量の制御を行う。また充電制御ECUが充電量の制御を行う。これらの制御の連携によってリチウムイオン電池の過充電を防ぎ、安全に充放電制御を行う事が可能となる。

今回は、当社がこれまで開発してきた車載のみならず、リチウムイオン電池の用途として拡がりが見込まれる幅広い分野への展開をねらいとして標準BMS PFの開発を行ったのでここにその開発コンセプト、安全設計技術、高精度電池残量推定技術の紹介を行う。

2

開発コンセプト

2.1 開発プロセスの変更

当社がこれまで行ってきた車載向け製品の開発では、車両開発日程に合わせた2～3年程度の開発期間で、車両ごとに顧客の要求に基づいた個別開発を行うという開発プロセスであった(図2)。

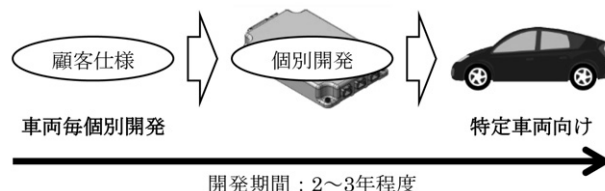


図2 従来の開発プロセス

しかし、リチウムイオン電池は前章の通り様々な分野で採用が進んでおり、これら幅広い用途に従来のプロセスで個別開発を行うと、開発費や開発リソースの増大といった問題が発生してしまう。そのため、限られたリソースで効率的に開発を行う方策として幅広い用途に対応できるBMS仕様を先行調査し、幅広い仕様に対応できる『標準BMS PF』を先行開発するというプロセスで開発を行った(図3)。

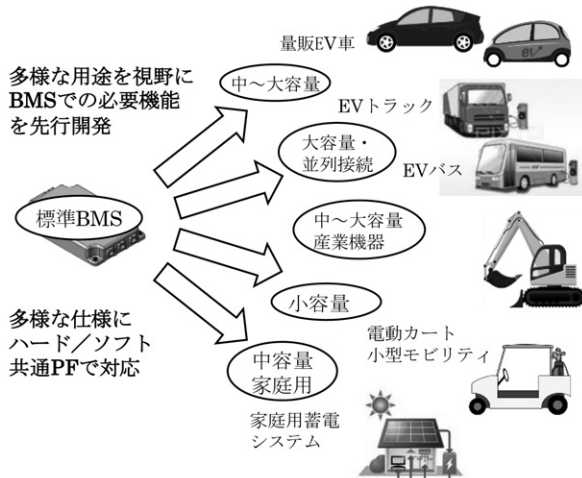


図3 幅広く展開できるPFを先行開発するプロセス

2.2 標準BMS PFの開発仕様

図4に各用途でのBMSに要求される機能の一例と標準BMS PFの仕様を示す。各用途での要求機能は、他社ECUのベンチマーク、市場動向調査、自動車メーカー、システムメーカー（電池メーカー）の要求聞き取りにより決定していった。

BMSの用途には、数量の見込めるEV車もあるが、多品種だが小量な物も多く、これら少量なBMSを専用設計すると開発費が高み、製品価格が高くなる。そこで、多機能、高容量のEVとそれら少量多品種向けの設計仕様を共通化する事でコストダウンを狙った。

	EV車	バス/ トラック	家庭用 蓄電池	モビリ ティ	標準 BMS PF
セル数	96	96	32,48, 96	8,14, 28	8~96
並列バック	×	○ (2,4)	○ (2,4,8)	×	○ (~8)
リレー制御	○ (3)	○ (3)	×	×	○ (5)
電流モニタ	○	○	○	○	○
絶縁抵抗検知	○	○	○	×	○
FAN制御	○	○	×	×	○
温度モニタ数	○ (4)	○ (4+α)	○ (2)	○ (2)	○ (7)
衝突検知	○	○	×	×	○
汎用I/O	将来要求される機能を想定して 拡張機能を準備				○ (4)
汎用PWM 入力					○ (4)

図4 各用途での要求と標準BMS PF仕様

また、現在わかっている要求機能を網羅しただけでは、今後新たに出てくる用途でのBMS機能に対応できない可能性も考えられる。そこで、調査結果より各要求を回路機能へ落とし込みを行い、将来要求される機能を想定し、汎用デジタル入出力端子、PWM入出力を拡張I/Oとして準備した。

2.3 標準BMS PFの実現方法

標準BMS PFにおいては、同一の筐体と回路基板で全ての仕様にスケラブルに対応できる構成を実現した。

図5に全ての機能を網羅したフル機能96cell仕様の標準BMSの機能ブロックを示す。また、図6に家庭用蓄電池用48cell仕様の機能ブロック図、図7に小型モビリティ用20cell仕様の機能ブロック図を示す。

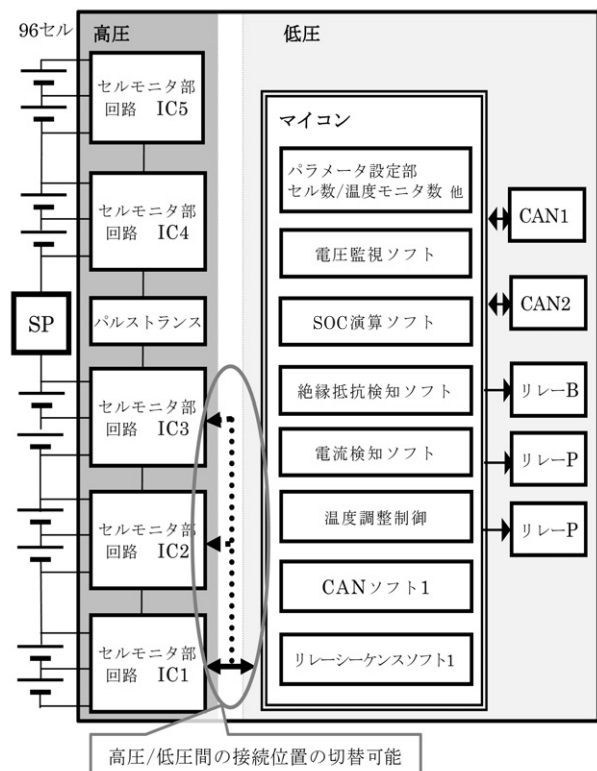


図5 フル機能96cell仕様の標準BMSブロック図

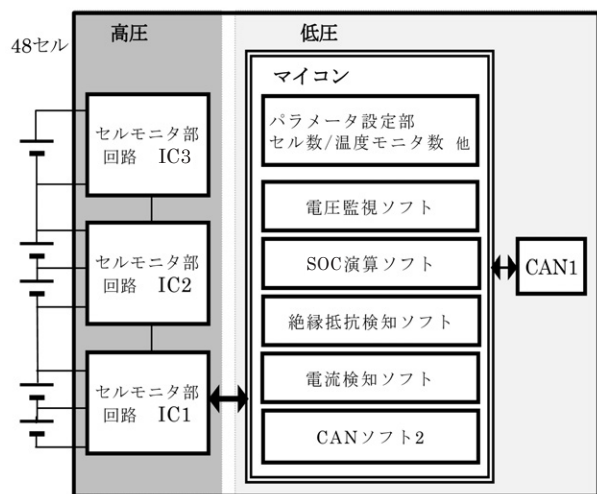


図6 家庭用蓄電池用48cell仕様の機能ブロック図

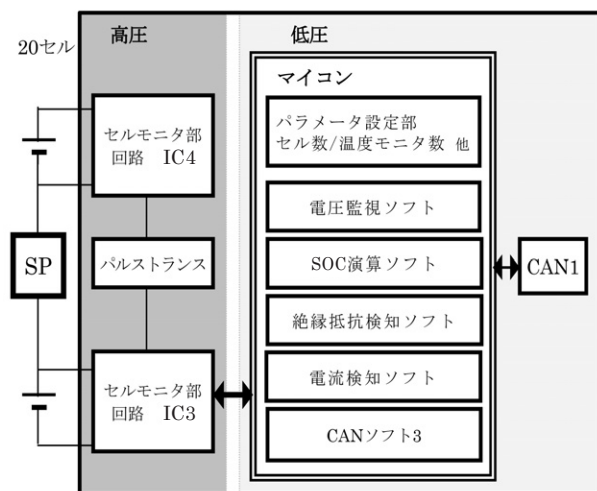


図7 小型モビリティ用20cell仕様の機能ブロック図

ハード面では全ての機能を盛り込んだ回路基板の設計を行い、図5のフル機能仕様を実現可能とした。また、図6の家庭用蓄電池用、図7のモビリティ用への適用時には基板上部品の抜き差し（実装/非実装）により、要求セルモニタ数や温度センサ数、リレー制御の有無といった仕様差に対応できるようになっている。

ソフト面についても同様に、パラメータ設定部にセル数/サーミスタ数/電流センサ本数を切替える事で仕様差に対応可能であり、顧客仕様によって異なるCANソフトやリレーシーケンスはソフト部品を入れ替える事で容易に変更可能な構造とした。

セル数を変更した場合に、電池パック内に搭載されるサービスプラグ（以下SP）位置の変更対応が必要

となる（図5）。サービスプラグとは車両メンテ時のサービスマンの感電に対する安全性確保のための絶縁用プラグであり、外す事で電流経路を遮断でき安全が確保できる。

通常、SPは直列に接続された電池セルの中央部付近に配置され、BMS基板内でもSP位置に合わせてパルストランスを配置して回路絶縁が必要となる。また、基板内のマイコンから各セルモニタICへの通信は、最下位IC（図5の場合はIC1）を介して行うので、セル数の少ない電池パックに対応する際は、通常、上位のICから削減していく。少セル数かつSPありの仕様に自在に対応するには、各IC間にパルストランスを配置できる様に基板設計すればよいが、基板サイズが大きくなり、コストも目標を超えてしまう。

そこで、標準BMS PFでは、図5のように基板内の低圧-高圧間の通信位置を可変できる様にする事により、パルストランスで回路絶縁を行う位置を一カ所とできた。これにより、小セルかつSPありの電池パック仕様にも、図7のように使用するICを可変して対応可能であり、小さい基板サイズ、低コストを実現している。

2.4 要求機能への対応（セルバランス機能）

BMSの重要な機能にセルバランス機能がある。セルバランス機能は図8に示す通り各セル間の電池容量のバラツキをなくす事で、最大限に電池容量を活かす為の機能である。電池パック内で各電池電圧にバラツキが発生してしまうと充電リミット、放電リミットまで使えない状態となってしまう実使用上の電池容量が低下してしまう。この状態を解消する手段がセルバランス機能であり、電池を直列化した（パック化）したシステムの場合、電池性能を最大限に引き出すために必要な機能である。

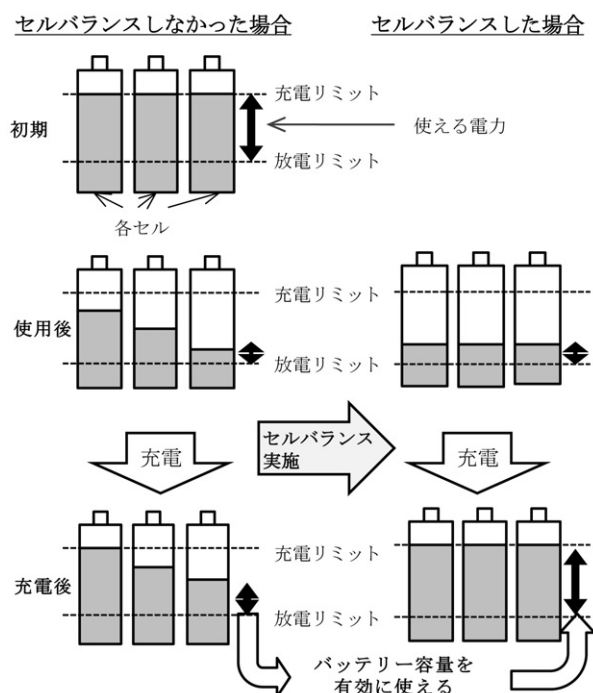


図8 セルバランス機能とは

当社の標準BMS PFにおいては電圧の高いセルを放電SWにより強制的に放電させる「パッシブセルバランス」という方法を採用している。従来の構成においては、図9に示す通り、電圧モニタ経路とセルバランス電流経路が同じであるため、経路抵抗と電流による電圧降下が発生し、セルバランス中には正確な電圧モニタが困難となる。そのため、充放電動作中/走行中に行うセル電圧測定精度が落ちてしまう問題があった。

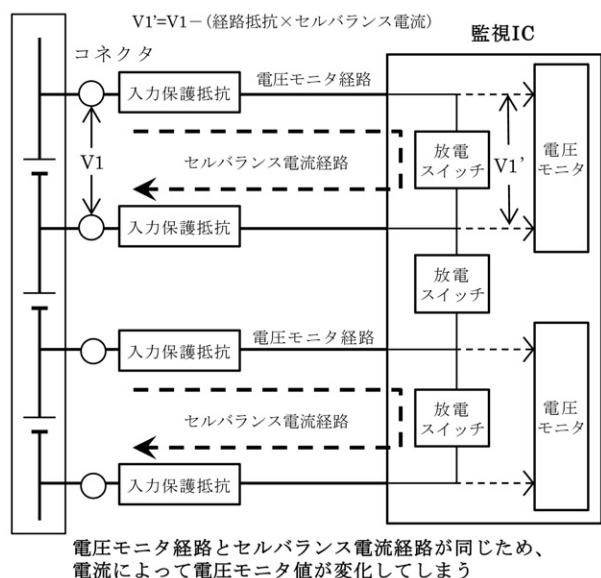
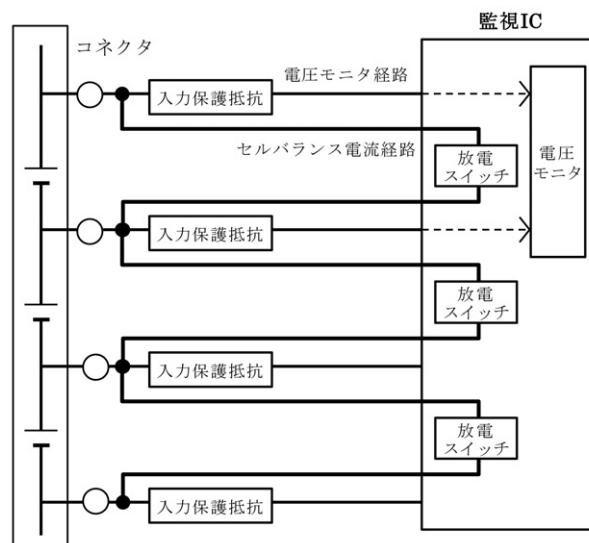


図9 従来の構成

これを解決するため、標準BMS PFでは図10の構成を採用した。BMSに要求される電圧モニタ精度は10mV以下が主流であり、基板のパターン抵抗も考慮する必要がある。図10の構成では電流経路と電圧モニタ経路をコネクタ直近で分離することでセルバランス時の電圧降下を抑え、セルバランス中においてもより正確な電圧モニタが可能となる（充放電動作中/走行中でもセル電圧測定精度を落とさずにセルバランスできるようなった）。

この機能は車載用途に対してだけでなく、家庭用蓄電池向けなどの常時稼働システムにおいて特に有効な機能となり得る。



- ①電圧モニタとセルバランス電流経路を別経路とする
- ②コネクタ直近で経路を分岐する

図10 動作中セルバランスの実現手法

3

安全設計技術

3.1 BMS安全設計の重要性と機能安全規格対応

前述の通り、リチウムイオン電池は取り扱いを誤ると重大な問題を起こす可能性がある。そのため、電池を監視するBMSにも安全設計が必要であり、以下のリスクに特に着目した設計を行っている。

- ・ 過充電によるリチウムイオン電池発火(図11)
- ・ ユーザが高電圧に感電(図12)

また、自動車業界では国際規格ISO26262(機能安全)の適用が標準化されようとしている。機能安全は

電子化が進む自動車制御において、性能と安全のバランスを確保するために、多数の自動車関連メーカーが参加し制定された規格である。規格では故障が引き起こす事象の危険度に応じてASIL（自動車用安全度水準）A～Dのランクが定められている。標準BMS PFでは、特に危険度の高い「過充電によるリチウムイオン電池の発火」について、最高レベルのASIL-Dまで対応可能な設計仕様で開発を行った。

本章では、標準BMS PFの特徴的な安全設計について説明する。

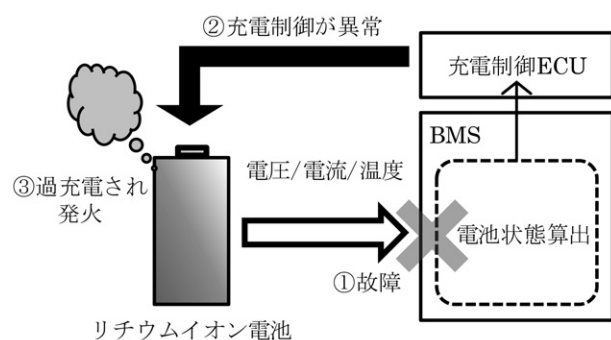


図11 リチウムイオン電池発火

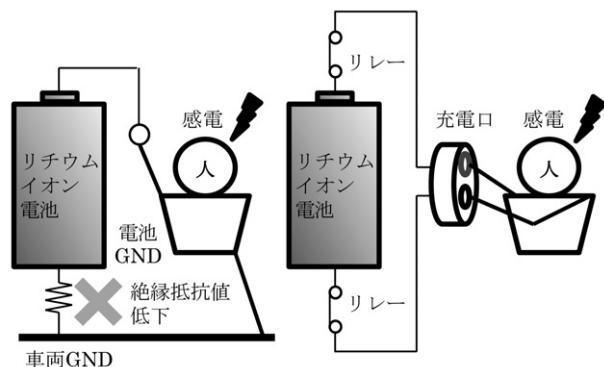


図12 ユーザーが高電圧に感電

3.2 電池発火に対する安全設計(機能安全ASIL-D対応)

3.2.1 設計構想

リチウムイオン電池発火を防止するための設計構想では、BMSの主機能(Main Function:MF)を『リチウムイオン電池の電圧・電流・温度をモニタし充放電状態を制御すること』と定義する。主機能が故障し充電制御不可となり過充電が発生した場合でも、電池を発火させないために、過電圧を検出することで過充電を判断しリレー遮断を行う安全機能(1st Safety

Mechanism:1st SM)を追加した。さらに、1st SM故障を検出する安全機能(2nd Safety Mechanism:2nd SM)を追加し、主機能、1stSM、2ndSMの三重で安全を確保する構想としている(図13)。

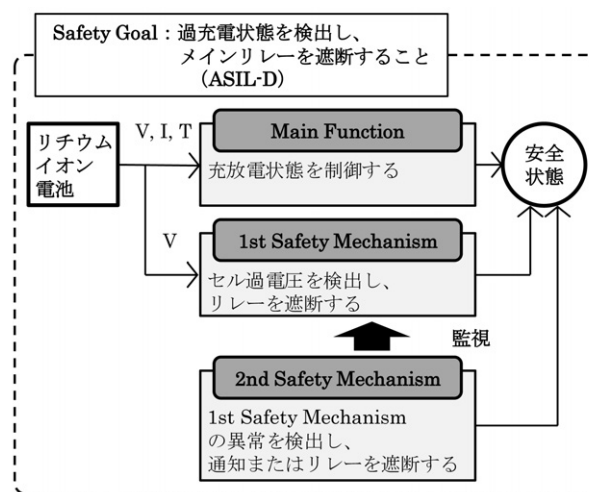


図13 電池発火に対する安全設計構想

3.2.2 1st Safety Mechanismの設計

前節で述べた設計構想の1stSMを、標準BMS PFでは図14のハード構成で機能実現している。

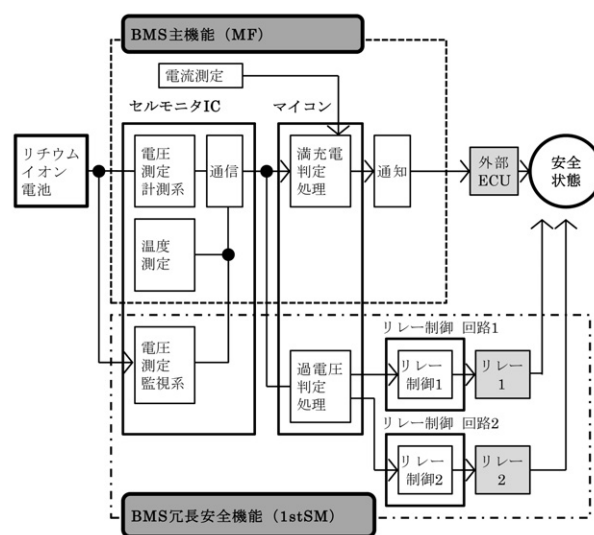


図14 標準BMS PFでの1stSM構成

本構成では、セルモニタICによる電池セル電圧測定を「計測系」と「監視系」の二重で行う事で冗長化している。また、セル測定電圧から、マイコンで過電圧を判定し、2系統で冗長化されたリレーの遮断を行う構成としている。これにより、セル過充電発生に至る危険側故障を、ASIL-Dで要求される99%以上の故障検

出率で検出可能である。

ここで、セルモニタICとマイコンはMFと1stSMが同一デバイス内に存在する構成となっている。そのため、共通故障の発生を考慮し、対策を行っている。その対策設計の一部を下記で説明する。

(1) セルモニタICの共通故障対策

セルモニタICの内部構造を図15に示す。電圧測定計測系と監視系がそれぞれ個別に電源、MUX、ADC、データ処理、クロックを持ち、構造分離されているICを採用した。また、マイコンとのデータ通信は計測系と監視系で共通となっているため、通信異常検出を行っている。

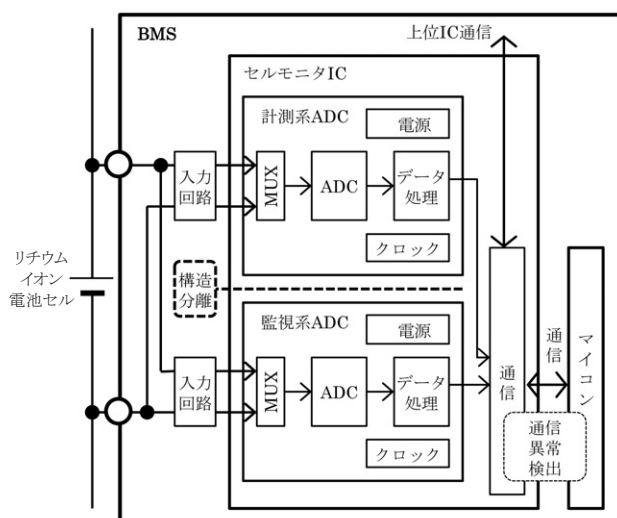


図15 セルモニタIC内部構成

(2) マイコンの共通故障対策

処理用コアと監視用コアの二つのコアで同一の演算を行い、演算結果が一致することを確認する「デュアルコアロックステップ」機能と、MFと1stSMで使用するメモリ領域を分ける「MPU(Memory Protection Unit)」機能を持つマイコンを採用した。デュアルコアロックステップで演算結果が不一致となった場合、マイコンは自らリレー遮断を行えない状態である可能性があるため、電源ICへ異常発生を通知し、通知を受けた電源ICからリレー遮断制御を行える設計としている(図16)。

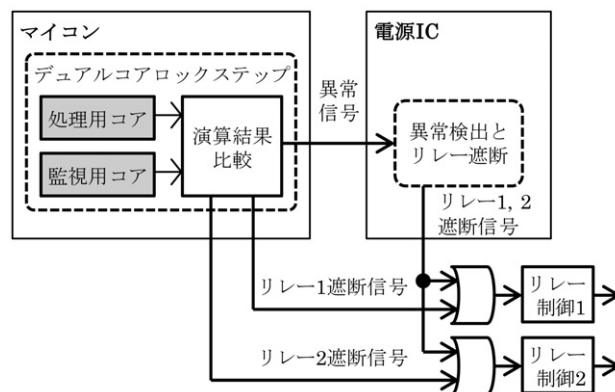


図16 マイコン異常時の電源ICによるリレー遮断

3.2.3 2nd Safety Mechanismの設計

1stSMの故障を検出するため、各種診断を2ndSMとして行っている。各回路ブロックで実施している診断内容を下記で紹介する。

(1) セルモニタICの診断(2ndSM)

電圧測定計測系、監視系それぞれで測定したセル電圧値をマイコンで比較することで、各測定の正しさを診断する。

(2) マイコン、電源ICの診断(2ndSM)

Built-In-Self-Test (BIST)と呼ばれる診断を行っている。BISTはチップ内部でテストパターン発生から判定までを行う方式で、ロジックやメモリ、アナログ回路の診断が可能である。

(3) リレー制御回路、リレーの診断(2ndSM)

特定パターンに従い、リレーのON/OFFを行うことでリレー制御回路とリレーの異常を診断する。

3.3 感電に対する安全設計

ユーザ感電を防ぐために、標準BMS PFでは絶縁抵抗値の測定と充電口電圧の測定を行う回路を搭載している。以下で各回路を紹介する。

(1) 絶縁抵抗検知回路

車両GNDと電池GNDをカップリング接続し、パルス電圧を印加することで絶縁抵抗値を電圧値に変換し測定している。カップリング接続にはコンデンサを用いているが、そのショート故障は即絶縁抵抗値低下につながるため、コンデンサを3直列とした安全設計としている。また、テスト信号を入力することで回路の正しさを確

認する自己診断機能も搭載している(図17)。

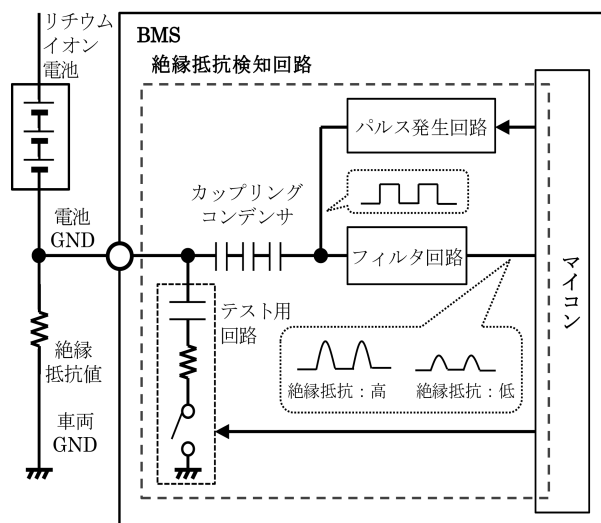


図17 絶縁抵抗検知回路

(2) 充電口電圧測定回路

ユーザが充電口に触れる可能性がある時に、充電口に電圧が出ていないかを測定している。回路は充電口プラス側入力回路とマイナス側入力回路から成り、各回路を2系統ずつ設けることで冗長化している。各回路の入力論理の組合せにより回路自己診断を行うことが可能な設計となっている(図18)。

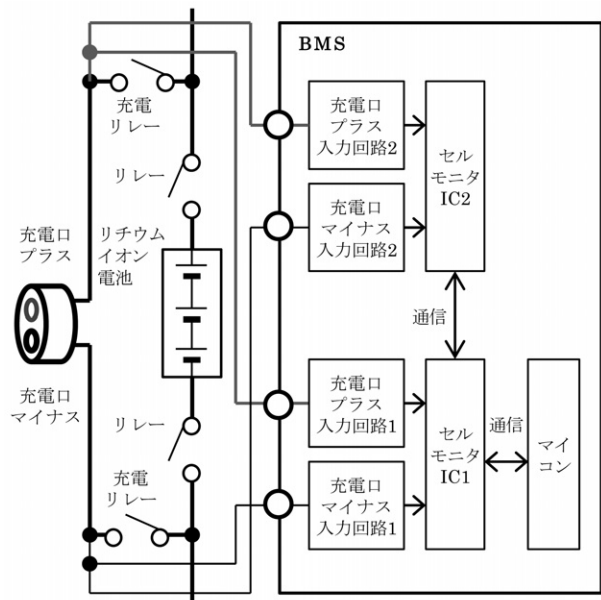


図18 充電口電圧測定回路

4 電池推定アルゴリズムの開発

4.1 電池容量を高精度に推定する必要性

リチウムイオン電池には使用すると発火等のリスクがある使用禁止の領域があり、その領域の使用を避けるために、マージンが設けられている(図19)。

マージンの大きさは電池残量(以下SOC)の推定精度に起因する。SOCの推定精度が高くなることで、マージンが狭まり、電池の使用できる容量が拡大し、車の燃費向上や、航続距離の延伸に繋がる。このことから電池の性能を活かすためにはSOCを高精度に推定することが非常に重要である。

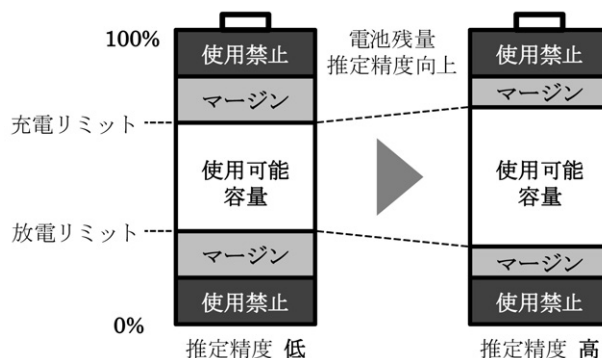


図19 電池容量イメージ

一般的にはSOC推定誤差5~10%程度と言われているが、当社電池推定アルゴリズムでは目標推定誤差を3%以下とし、富士通(株)と共同で開発に取り組んだ。

4.2 電池推定アルゴリズム

SOCを推定するためには、相関関係が強い電池の開放電圧(OCV)を計測する事が重要である。しかしOCVは電池が負荷から完全に切り離され、状態が安定している際の端子電圧を指しているため、電流負荷中にOCVを計測する事は困難である。この問題を解決するために、電流負荷中の電池端子電圧がOCVと電池内部抵抗による過電圧分の和となる特性を利用する。

当社アルゴリズムでは電池の等価回路モデルにより、電池内部抵抗を計算し、逐次、端子電圧を推定する。推定した端子電圧と実際に計測した端子電圧を比較して、その誤差が小さくなるようにカルマンフィルタという統計的手法を用いて補正し、SOCを推定している。

4.2.1 電池等価回路モデル

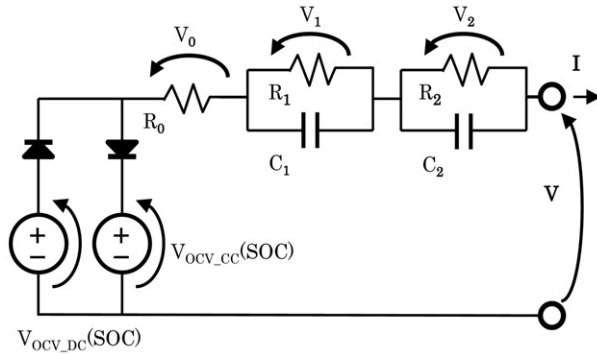


図20 電池等価回路モデル

電池状態を推定するために、電池の入力（電流、温度）と出力（電圧）に着目し、RCを構成要素として同定し求めた電池等価回路モデルを用いる（図20）。

モデルを数式化すると以下となる。

$$x^-(k) = \begin{pmatrix} dV_1/dt \\ dV_2/dt \\ SOC(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/R_1 C_1 \times V_1(k-1) + 1/C_1 \times I(k-1) \\ -1/R_2 C_2 \times V_2(k-1) + 1/C_2 \times I(k-1) \\ SOC(k) + (1/SCA) \times I(k-1) \times \Delta t \end{pmatrix}$$

$$OCV(k) = f(SOC(k)) \quad k: \text{標本(データ)}$$

V_1, R_1, C_1 は電極表面の電圧、抵抗、容量、 V_2, R_2, C_2 は活物質の電圧、抵抗、容量とし、 R_0 は電解質抵抗、 I は入力電流、 SCA は満充電容量とする。これらのパラメータは電池の種類が変わるたびに同定する必要がある。 R_1, R_2, C_1, C_2 は R_0 と入力電流の関数で表しており、内部抵抗の電流依存性を考慮できるようにしている。

電池のOCVは、充放電カーブフィッティングによりSOC-OCVと関数化し、温度と電池劣化量により補正して依存性を反映する。また、OCVは充電側（Vocv_cc）と放電側（Vocv_dc）とで分けて定義し、電池への入力電流の傾向で切り替えている。この手法によりOCVのSOC依存性を高い精度で関数化する事が可能となり、SOCの推定誤差を縮めることが出来る。

4.2.2 電池推定アルゴリズム構成

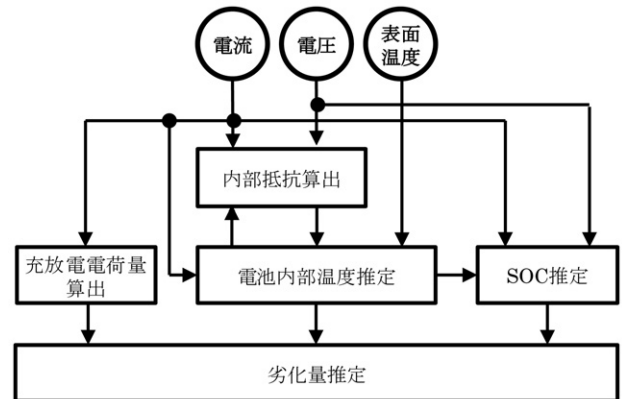


図21 電池推定アルゴリズムの構成

当社電池推定アルゴリズムは図21で示す構成でSOCに加え、電池劣化量を推定する。次項において各部の処理概要を説明する。

(1) 内部抵抗算出

電池等価回路モデル内の内部抵抗 R_0 をその時の電池電圧と入力電流により、以下のように計算をする。
 $R_0 = \text{電圧変化} / \text{入力電流変化}$

また、 R_0 は実測による電圧、入力電流から計算している。この手法により温度、電池劣化量を考慮した内部抵抗を導き出すことが可能となる。

(2) 充放電電荷量算出

入力電流から充電、放電毎に移動した電荷量をカウントする。

(3) 電池内部温度推定

①～③のフローで電池内部温度を推定する。

①内部抵抗と入力電流から温度上昇（発熱量）を計算

②推定した内部温度と表面温度の差から温度変化（熱の出入り）を計算

③ ①②から内部温度を推定

温度変化=①+②

電池内部推定温度=旧電池内部推定温度+温度変化

(4) SOC推定

電池等価回路モデル式から電池端子電圧推定値 V_P を算出する。

$$V_p = V_1(k) + V_2(k) + OCV(k) + R_0 \times I(k)$$

推定値と実測端子電圧 V を比較し、カルマンフィルタ

により、誤差の重み付け係数であるカルマンゲイン G を算出して、推定値を補正する。この処理を電池への入力値測定毎に繰り返す。

$$y(k) = V_p(k) - V(k) \quad , \quad x(k) = x^-(k) + G(k) \times y(k)$$

$y(k)$: 測定値と推定値の誤差

$x^-(k)$: 推定値, $x(k)$: 補正後の推定値

(5) 劣化量推定

劣化量は高温時に優勢な放置劣化と、低温充放電時に優勢な電流劣化の加算で定義する。

放置劣化は温度、SOC、時間の関数、電流劣化は温度と移動した電荷量の関数とする。

4.3 推定精度評価

EV走行時の充放電パターンを基に当社電池推定アルゴリズムのSOC推定精度を評価した。図22で示すように、推定値と真値の誤差を3%以下と高い精度で推定できている。

また、電池劣化量(容量比劣化)推定についても評価を行った。図23のように、112サイクル(約2カ月間)の充放電評価により、実際に測定した容量比劣化(真値)の推移と比較し、当社アルゴリズムの推定値が高精度であることを確認した。

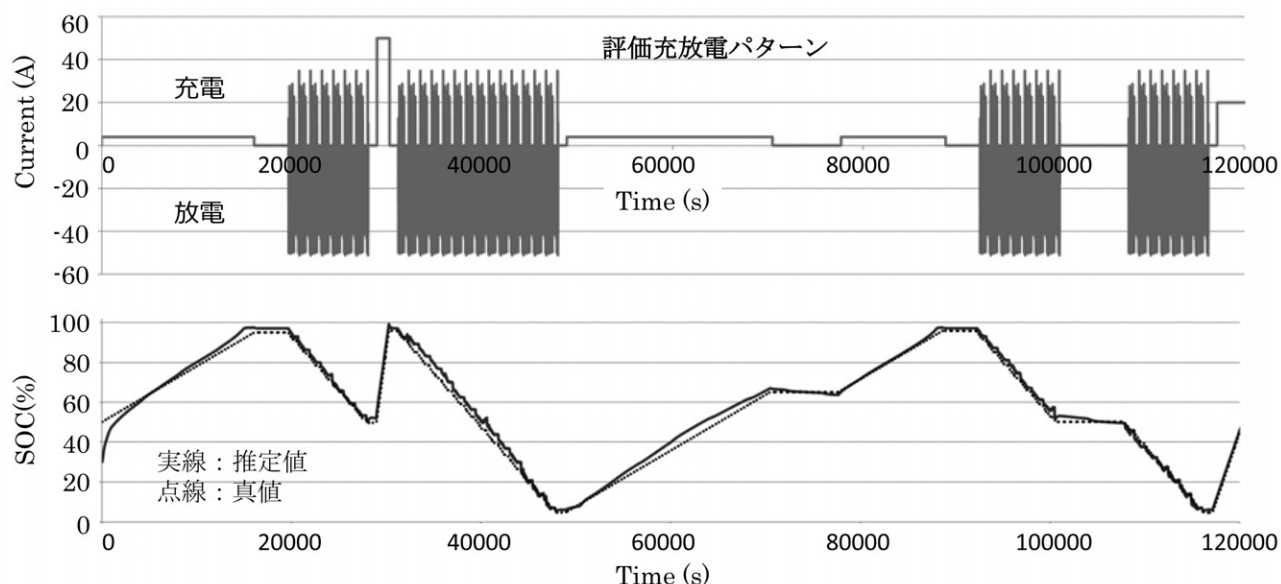


図22 SOCの推定値と真値の推移

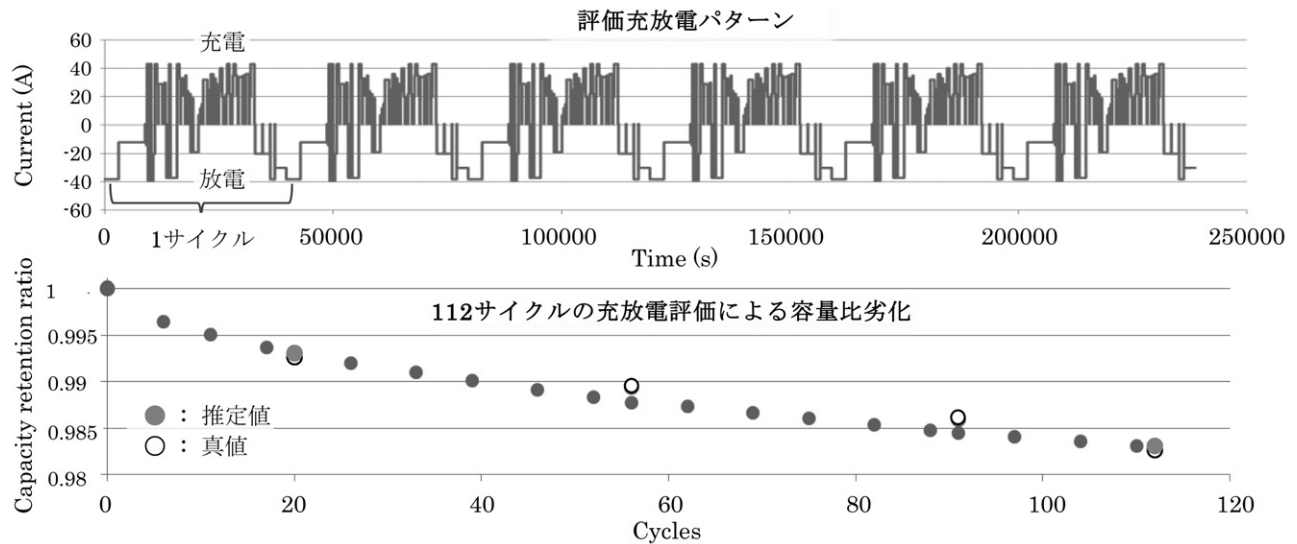


図23 電池劣化量(容量比劣化)の推定値と真値の推移

5

おわりに

今回開発した標準BMS PFの概要及び開発技術について述べた。標準BMS PFは幅広い用途へ適用可能な仕様となっており、提供しているサンプル試作品も好評であるため、ねらいどおりの開発が行えたといえる。しかし、BMSの性能、機能向上はまだ続くと考えており、今回の開発で得たノウハウを活かしてより高性能・高性能・低コストなBMSを開発していく。

なお、本バッテリーマネジメントシステムの仕様検討や開発においては、お客様・部品サプライヤー様・設

計会社様の協力を得て行なってきた。本開発にあたり、ご指導を賜ったお客様をはじめ技術協力を賜った関係各位に対して、心より感謝申し上げます。

筆者紹介



藤田 嘉和
(ふじた よしかず)

AE技術本部
制御システム技術部



廣瀬 育之
(ひろせ やすゆき)

AE技術本部
制御システム技術部



加藤 優典
(かとう ゆうすけ)

AE技術本部
制御システム技術部



渡辺 雄大
(わたなべ たかひろ)

AE技術本部
制御システム技術部