

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-146748

(P2016-146748A)

(43) 公開日 平成28年8月12日(2016.8.12)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
H02J 7/02 (2016.01)	H02J 7/02 G	5G503
H02J 7/00 (2006.01)	H02J 7/00 Y	
	H02J 7/02 H	

審査請求 未請求 請求項の数 21 O L (全 40 頁)

(21) 出願番号	特願2016-86054 (P2016-86054)	(71) 出願人	511314599
(22) 出願日	平成28年4月22日 (2016.4.22)		ザ リージェンツ オブ ユニバーシティ
(62) 分割の表示	特願2013-503944 (P2013-503944) の分割		ー オブ ミシガン
原出願日	平成23年4月7日 (2011.4.7)		アメリカ合衆国 48109 - 259
(31) 優先権主張番号	12/758, 449		〇 ミシガン、アナーバー、ヒューロン
(32) 優先日	平成22年4月12日 (2010.4.12)		パークウェイ 1600、セカンド フロ
(33) 優先権主張国	米国 (US)		アー、オフィス オブ テクノロジー ト
(31) 優先権主張番号	PCT/US2010/030525	(74) 代理人	110000855
(32) 優先日	平成22年4月9日 (2010.4.9)		特許業務法人浅村特許事務所
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(72) 発明者	キム、ハーンサン
(31) 優先権主張番号	12/757, 293		アメリカ合衆国、ミシガン、アナーバー
(32) 優先日	平成22年4月9日 (2010.4.9)		、ウッドビュー エルエヌ 2407
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

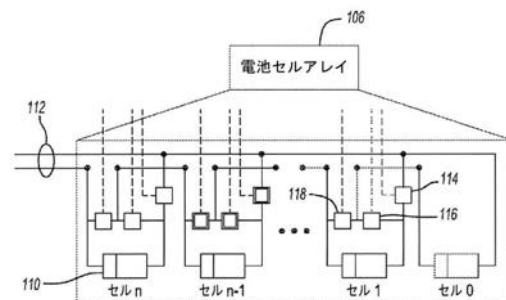
(54) 【発明の名称】 大規模電池システムのための動的に再構成可能な枠組み

(57) 【要約】

【課題】 大規模電池システムのために動的に再構成可能な枠組みを提供する。

【解決手段】 この枠組みは、アプリケーションの負荷に結合された1つの電池セルアレイを形成するように互いに隣接して配置された複数の電池回路を備える。所与の1つの電池回路は、1つの入力端子と1つの出力端子とを具備した1つの電池セルと、前記負荷と前記電池セルの1つの入力端子との間に接続された第1のスイッチと、前記電池セルの1つの入力端子と、すぐ隣に隣接する電池回路内の1つの電池セルの1つの出力端子との間に接続された第2スイッチと、前記電池セルの前記出力端子と前記隣接する前記電池回路内の前記電池セルの前記出力端子との間に接続された第3のスイッチとを備える。この電池セルアレイはまた、前記複数の電池回路内の前記スイッチを選択的に制御する1つのローカルコントローラを備える。

【選択図】 図10



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

2つの接続を介して1つの負荷と結合され、1つの電池セルアレイを形成するように互いに隣接して配置された複数の電池回路であって、前記複数の電池回路のうちの所与の1つの電池回路は、

1つの入力端子と1つの出力端子とを具備した1つの電池セルと、

前記負荷と前記電池セルの1つの入力端子との間に接続された第1のスイッチと、

前記電池セルの出力端子と前記隣接する電池回路内の前記電池セルの出力端子との間に接続された第3のスイッチと、

前記電池セルの前記入力端子と、前記第3のスイッチと前記隣接する電池回路内の前記電池セルの前記出力端子との間に電氣的に接続している中間ノードとの間に電氣的に接続された第2のスイッチと

を備える複数の電池回路と、

前記複数の電池回路のそれぞれの内のスイッチに動作可能に結合され、前記複数の電池回路内の前記スイッチを選択的に制御する1つのローカルコントローラとを備える再構成可能電池システム。

【請求項 2】

前記第2のスイッチを閉路位置とし、前記第1および第3のスイッチを開路位置とし、これにより当該電池セルを隣接する複数の電池回路内の電池セルと直列に設置する、請求項1記載の再構成可能電池システム。

【請求項 3】

前記第2および第3のスイッチを閉路位置とし、第1のスイッチを開路位置とし、これにより当該電池セルが隣接する複数の電池回路内の電池セルと直列であるときに、当該電池セルをバイパスする、請求項1記載の再構成可能電池システム。

【請求項 4】

前記第2のスイッチを開路位置とし、前記第1および第3のスイッチを閉路位置とし、これにより当該電池セルを隣接する複数の電池回路内の電池セルと並列に設置する、請求項1記載の再構成可能電池システム。

【請求項 5】

前記第1および第2のスイッチを開路位置とし、第3のスイッチを閉路位置とし、これにより当該電池セルが隣接する複数の電池回路内の電池セルと並列であるときに、当該電池セルをバイパスする、請求項1記載の再構成可能電池システム。

【請求項 6】

前記負荷と前記電池セルアレイ用の1つの入力ノードとの間に接続された第1のアレイレベルスイッチと、

前記電池セルアレイ用の前記入力ノードと、1つの隣接する電池セルアレイの1つの出力ノードとの間に接続された第2のアレイレベルスイッチと、

前記電池セルアレイ用の前記出力ノードと、前記隣接する電池セルアレイの前記出力ノードとの間に接続された第3のアレイレベルスイッチと

をさらに備える、請求項1記載の再構成可能電池システム。

【請求項 7】

前記第1、第2、および第3のアレイレベルスイッチに動作可能に結合され、前記第1、第2、および第3のアレイレベルスイッチを選択的に制御する1つのグローバルコントローラをさらに備える、請求項6記載の再構成可能電池システム。

【請求項 8】

前記グローバルコントローラが、前記電池セルアレイをバイパスするように、前記第1、第2、および第3のアレイレベルスイッチを制御する、請求項7記載の再構成可能電池システム。

【請求項 9】

前記電池セルアレイのそれぞれと関連するローカルコントローラをさらに備え、前記グ

ローバルコントローラが前記ローカルコントローラとシステム・マネジメント・バス・プロトコル (Systems Management Bus protocol) に基づき、データバス上でデータ通信を行う、請求項 7 記載の再構成可能電池システム。

【請求項 10】

1 つの負荷に結合され互いに隣接した複数の電池回路であって、前記複数の電池回路内の第 n 番目の電池回路が、

1 つの入力端子と 1 つの出力端子とを具備した 1 つの電池セルであって、前記出力端子が第 $n + 1$ 番目の電池回路に接続されている電池セルと、

前記負荷と前記電池セルの前記入力端子との間に接続された第 1 のスイッチと、

前記電池セルの前記出力端子と、第 $n - 1$ 番目の電池回路内の前記電池セルの前記出力端子との間に接続された第 3 のスイッチと、

前記電池セルの前記入力端子と、前記第 3 のスイッチと前記第 $n - 1$ 番目の電池回路内の前記電池セルの前記出力端子との間に電氣的に接続している中間ノードとの間に電氣的に接続された第 2 のスイッチと

を備える複数の電池回路

を備える再構成可能電池システム。

【請求項 11】

第 n 番目の電池回路内の前記複数のスイッチに動作可能に結合され、前記第 n 番目の電池回路内の前記第 2 のスイッチを閉路し、前記第 1 および第 3 のスイッチを開路し、これにより前記電池セルを隣接する複数の電池回路内の電池セルと直列に設置する 1 つのコントローラをさらに備える、請求項 10 記載の再構成可能電池システム。

【請求項 12】

第 n 番目の電池回路内の前記複数のスイッチに動作可能に結合され、前記第 n 番目の電池回路内の前記第 2 および第 3 のスイッチを閉路し、前記第 1 のスイッチを開路し、これにより前記電池セルが隣接する複数の電池回路内の電池セルと直列になっているときに、当該電池セルをバイパスする 1 つのコントローラをさらに備える、請求項 10 記載の再構成可能電池システム。

【請求項 13】

第 n 番目の電池回路内の前記複数のスイッチに動作可能に結合され、前記第 n 番目の電池回路内の前記第 2 のスイッチを開路し、前記第 1 および第 3 のスイッチを閉路し、これにより前記電池セルを隣接する複数の電池回路内の電池セルと並列に設置する 1 つのコントローラをさらに備える、請求項 10 記載の再構成可能電池システム。

【請求項 14】

第 n 番目の電池回路内の前記複数のスイッチに動作可能に結合され、前記第 n 番目の電池回路内の前記第 1 および第 2 のスイッチを開路し、前記第 3 のスイッチを閉路し、これにより前記電池セルが隣接する複数の電池回路内の電池セルと並列になっているときに、当該電池セルをバイパスする 1 つのコントローラをさらに備える、請求項 10 記載の再構成可能電池システム。

【請求項 15】

互いに隣接する複数の電池セルアレイであって、前記電池セルアレイのそれぞれは 1 つの入力ノードと 1 つの出力ノードとを定め、その中に複数の電池セルを備える電池セルアレイと、

1 つの所与の電池セルアレイに対して、

1 つの負荷と前記所与の電池セルアレイ用の前記入力ノードとの間に結合された第 1 のアレイレベルスイッチと、

前記所与の電池セルアレイ用の前記出力ノードと隣接する電池セルアレイの出力ノードとの間に結合された第 3 のアレイレベルスイッチと、

前記所与の電池セルアレイ用の前記入力ノードと、前記第 3 のアレイレベルスイッチと前記隣接する電池セルアレイの出力ノードとの間に電氣的に結合している中間ノードとの間に結合された第 2 のアレイレベルスイッチと、

10

20

30

40

50

前記所与の電池セルアレイの前記第 1、第 2、および第 3 のアレイレベルスイッチを選択的に制御する、1つのグローバルコントローラとを備える再構成可能電池システム。

【請求項 16】

前記第 2 のアレイレベルスイッチを閉路位置とし、前記第 1 および第 3 のアレイレベルスイッチを開路位置とし、これにより前記所与の電池セルアレイを、隣接する複数の電池セルアレイと直列に設置する、請求項 15 記載の再構成可能電池システム。

【請求項 17】

前記第 2 および第 3 のアレイレベルスイッチを閉路位置とし、前記第 1 のアレイレベルスイッチを開路位置とし、これにより前記所与の電池セルアレイが隣接する複数の電池セルアレイと直列であるとき、前記所与の電池セルアレイをバイパスする、請求項 15 記載の再構成可能電池システム。

【請求項 18】

前記第 2 のアレイレベルスイッチを開路位置とし、前記第 1 および第 3 のアレイレベルスイッチを閉路位置とし、これにより前記所与の電池セルアレイを、隣接する複数の電池セルアレイと並列に設置する、請求項 15 記載の再構成可能電池システム。

【請求項 19】

前記第 1 および第 2 のアレイレベルスイッチを開路位置とし、前記第 3 のアレイレベルスイッチを閉路位置とし、これにより前記所与の電池セルアレイが隣接する複数の電池セルアレイと並列であるときに、複数の前記所与の電池セルアレイをバイパスする、請求項 15 記載の再構成可能電池システム。

【請求項 20】

前記所与の電池セルアレイが、

互いに隣接して配置された複数の電池回路であって、前記複数の電池回路のうちの所与の 1 つの電池回路が、

1 つの入力端子と 1 つの出力端子とを具備した 1 つの電池セルと、

前記電池セルアレイの前記入力ノードと前記電池セルの 1 つの入力端子との間に結合された第 1 のセルレベルスイッチと、

前記電池セルの 1 つの入力端子と、すぐ隣に隣接する電池回路内の 1 つの電池セルの 1 つの出力端子との間に結合された第 2 のセルレベルスイッチと、

前記電池セルの前記出力端子と前記隣接する電池回路内の前記電池セルの前記出力端子との間に結合された第 3 のセルレベルスイッチと

を備える複数の電池回路

をさらに備える、請求項 15 記載の再構成可能電池システム。

【請求項 21】

前記所与の電池セルアレイと関連し、前記所与の電池セルアレイ内の前記複数のスイッチを選択的に制御可能である、1つのローカルコントローラをさらに備える、請求項 20 記載の再構成可能電池システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

(関連出願の相互参照)

本出願は 2010 年 4 月 12 日に提出された合衆国特許出願第 12/758,449 号、並びに 2010 年 4 月 9 日に提出された国際出願 PCT/US2010/030525 号に基づく優先権を主張する。合衆国特許出願第 12/758,449 号は、2010 年 4 月 9 日に提出された合衆国特許出願第 12/757,293 号の一部継続出願であり、これは 2009 年 4 月 10 日に提出された合衆国仮出願第 61/168,472 号の利益を主張する。上記出願の全開示はここに参照することにより本明細書に組み込まれている

10

20

30

40

50

ものとする。

【0002】

本開示は電池の管理に関し、さらに詳細には大規模電池システムのための動的に再構成可能な枠組みに関する。

【背景技術】

【0003】

ハイブリッド駆動を具備した電気自動車の需要は、主として燃料価格の最近の急上昇のため、世界的に急増している。しかしながら、従来の電気自動車（EVs）用の電池管理システムは場当たりの設計されており、電気自動車の供給が市場の需要に遅れを取っている。

10

【0004】

費用効果の良い電気自動車は高エネルギー密度の電池セルの開発だけではなく、各々が多数の電池セルで構成された大規模電池パックの効率的な管理をも必要としている。とりわけ、1つのパック内の電池セルを監視し制御する電池管理システム（BMS：Battery Management System）は、不均一な電池セル特性に対処しなければならない。すなわち、1つの電池パック内の全ての電池セルの特性が最初と同じであったとしても、それらを繰り返し充電および放電すると、各々のセルは異なる特性を示すようになるであろう。弱いセル—他よりも早く（充電および／または）放電されるセル—は（過充電および／または）過放電（deep-discharge）される傾向にあり、すなわち、この電池セルはその端子電圧がカットオフ電圧と呼ばれるある閾値未満に低下しても放電され続ける。この弱い電池セルは最終的に故障する可能性があり、適切に管理されないとパック全体を機能不全に至らしめるであろう。

20

【0005】

電池管理システムは複数の弱い／故障したセルに対して、それら故障したセルをバイパスして、パックを運転可能な状態に保つように対応できるべきである。しかしながら1つのパック内のあるセルをバイパスするということは、電池セルの接続配置を変更可能とする複数のスイッチを必要とする。複数のスイッチは電池セルのまわりに置かれ、電池供給電力を調節する。さらに、再構成可能な電池システム（reconfigurable battery system）は電池の接続を変更する方法を提供し、アプリケーションの需要に適合するように供給電力を動的に調整することができよう。これらのシステムはすべて、注意深いシステム仕様、対費用効果に優れた組み込み、そしてスイッチや電池セルのようなシステム構成部品の制御を必要とする。

30

【0006】

電池管理アーキテクチャの開発においては、2つの主要な克服課題が存在する。第1に、使用するハードウェア構成部品の最小個数と、BMS内での最大の再構築性との間にはトレードオフの関係が存在する。その中で鍵となる構成部品は、電池セルアレイを再構成可能とする複数のスイッチである。セルのまわりにスイッチが多ければ多いほど、アレイはより再構成可能となるが、高価にもなる。また、個々の構成部品はシステムの信頼性に直接影響する。システムの信頼性は構成部品の信頼性とそれらの接続とに基づき評価されるべきである。同時に、再構成可能なアーキテクチャを実現する際にコストは主要な考慮事項であるから、構成部品数は最小であるべきである。第2に、システムの再構成性と信頼性の両方を最大化するために、再構成可能なアーキテクチャはソフトウェア／ハードウェア構成部品およびそれらの相互関係について指定されなければならない。アプリケーション（ソフトウェア）はさまざまな電池（ハードウェア）の状態をBMSから必要とする。また、モジュール管理アーキテクチャの場合には、BMSは、もしサブシステム／ローカルBMSが存在する場合、これらに対して、個々の電池セルの状態に関する情報を要求することもある。この要求を受け取ると、個々のローカルBMSはその電池セルアレイを周期的に監視し、もし必要であれば、個々のセル特性にしたがって、それらを再構成する。このローカルBMS間の相互作用もまた、基になるハードウェア・システム設計に依存している。良好に設計され、組み合わせられたハードウェア・ソフトウェア電池管理アー

40

50

キテクチャは高い信頼性、費用効果、および拡張性を提供するはずである。

【0007】

本章は、必ずしも従来技術ではない、本開示に関連する背景情報を提供するものである。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0008】

【非特許文献1】 "Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell" J. of Power Sources, 140(6):1526-1533, 2003

【非特許文献2】 システム管理バス仕様、2.0版、技術報告、SBM実装者フォーラム 2000 (System Management Bus Specification ver. 2.0, Technical Report, SBM Implementer Forum, 2000) 10

【非特許文献3】 「Scheduling of Battery Charge, Discharge, and Rest」 by Hahnsan Kim and Kang G. Shin, Real-time Systems Symposium, pages 13-22, Washington, D.C., USA, Dec. 2009 IEEE Computer Society

【発明の概要】

【0009】

動的に再構成可能な枠組みが大規模電池システムのために提供されている。この枠組みは、アプリケーションの負荷に結合された1つの電池セルアレイを形成するように互いに隣接して配置された複数の電池回路を備える。所与の1つの電池回路は、1つの入力端子と1つの出力端子とを具備した1つの電池セルと、前記負荷と前記電池セルの1つの入力端子との間に接続された第1のスイッチと、前記電池セルの1つの入力端子と、すぐ隣に隣接する電池回路内の1つの電池セルの1つの出力端子との間に接続された第2のスイッチと、前記電池セルの前記出力端子と前記隣接する電池回路内の前記電池セルの前記出力端子との間に接続された第3のスイッチとを備える。この電池セルアレイはまた、前記複数の電池回路内の前記スイッチを選択的に制御する1つのローカルコントローラを備える。 20

【0010】

本開示の別の特徴として、この枠組みは、互いに隣接する複数の電池セルアレイを備え、前記電池セルアレイのそれぞれは1つの入力ノードと1つの出力ノードを定め、その中に複数の電池セルを備える。1つの所与の電池セルアレイは、1つの負荷と前記所与の電池セルアレイ用の前記入力ノードとの間に結合された第1のアレイレベルスイッチと、前記所与の電池セルアレイ用の前記入力ノードと1つの隣接する電池セルアレイの1つの出力ノードとの間に結合された第2のアレイレベルスイッチと、前記所与の電池セルアレイ用の前記出力ノードと前記隣接する電池セルアレイの前記出力ノードとの間に結合された第3のアレイレベルスイッチとを備える。グローバルコントローラは、前記所与の電池セルアレイの第1、第2、および第3のアレイレベルスイッチを選択的に制御する。 30

【0011】

さらなる適用可能な範囲は、ここに提供された説明から明らかであろう。この概要内の、説明および特定の例は例証のみを目的としたものであり、本開示の範囲を制限する意図はない。 40

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】 図1は再構成可能電池システムの配置例を表す模式図である。

【図2】 図2は定電圧の方針での電池セルの再構成を図示する模式図である。

【図3】 図3は動的電圧許容の方針での電池セルの再構成を図示する模式図である。

【図4】 図4は再構成の手法と従来の手法の違いを、1つの電池の寿命に関係させて図示するグラフである。

【図5】 図5は再構成により達成される電池寿命の利得を、直列鎖内の電池セルの数の関数として図示するグラフである。 50

【図 6】図 6 は需要電圧の変化と、対応する電力の提供を図示するグラフである。

【図 7】図 7 は動的電圧許容と定電圧維持の方針の比較を、最大供給可能電力によって示すグラフである。

【図 8 A】図 8 A は電圧需要を受ける動的再構成を、異なる放電率について示したグラフである。

【図 8 B】図 8 B は電圧需要を受ける動的再構成を、異なる放電率について示したグラフである。

【図 8 C】図 8 C は電圧需要を受ける動的再構成を、異なる放電率について示したグラフである。

【図 8 D】図 8 D は電圧需要を受ける動的再構成を、異なる放電率について示したグラフである。 10

【図 9】図 9 は別の再構成可能電池システム例の模式図である。

【図 10】図 10 は電池システム内に存在する電池セルアレイの構造を示す図である。

【図 11】図 11 は命令コードのシーケンスとスイッチの組み合わせの間の対応を示す図である。

【図 12】図 12 は直列および並列配置で構成されたスイッチの電力損を示すグラフである。

【図 13 A】図 13 A は再構成可能電池システムの信頼性を、従来型電池管理システムとの関係で示したグラフである。

【図 13 B】図 13 B は再構成可能電池システムの信頼性を、従来型電池管理システムとの関係で示したグラフである。 20

【図 14 A】図 14 A は、異なる冗長率で使用された際の再構成可能電池システムの信頼性を、従来型電池管理システムとの関係で図示したグラフである。

【図 14 B】図 14 B は、異なる冗長率で使用された際の再構成可能電池システムの信頼性を、従来型電池管理システムとの関係で図示したグラフである。

【0013】

ここに示された図は、可能な実施形態のすべてではなく、選択された実施例のみの図示を目的としたものであり、本開示の範囲を制限することを意図するものではない。これらの図のいくつかを通じて、対応する参照番号は対応する部品を示している。

【発明を実施するための形態】

30

【0014】

再充電可能な電池セルは、化学エネルギーを電気エネルギーに、またその逆の場合も同様に、変換することのできる、いずれのセルでもよい。これは通常、電気化学酸化還元反応により実現される。これらの反応は、電池セル内部の 2 つの電極内の電気活性種の間で、負荷を通して電子を交換することを伴い、電流の流れを作り出す。理想的には 1 つの電池セルからの電流単位、またはクーロンの総数はその全寿命期間を通して常に同じであるはずである。しかしながら実際には、反応速度論および拡散プロセスの不確かさおよび／または時間経過に伴う電池セル内での活性物質の溶解のために、電池セルの特性は理想にはほど遠い。電池セルの例としては、ニッケルメタルヒドライド (NiMH)、リチウムイオン、ニッケル・カドミウム (NiCd)、リン酸鉄リチウム、リチウム硫黄、チタン酸リチウム、ニッケル水素、ニッケルメタルヒドライド、ニッケル鉄、ナトリウム硫黄、バナジウム・レドックス (vanadium redox)、再充電可能アルカリが挙げられる。以下に記述されるアーキテクチャは、その他のタイプの再充電可能な電池セルと同様に、これらにも適用できる。

40

【0015】

再充電可能な電池セルは実際には異なる特性を見せる。例えば、電池端子電圧は、その放電の間、一定ではなく、電圧は放電率に対し非線形に降下する。放電率が大きいほど、電圧降下もより急になる。この理由により、供給電圧を変更し安定化させるために DC-DC コンバーターが使用される。第 2 に、電池容量は放電率とともに変化し、放電率が大きいほど、電池容量も低くなる。第 3 は、高い放電率では電池は充電回復効果が制限され

50

る。短時間の高負荷電流により、電気活性種の濃度勾配が大きくなり、反応と拡散速度との間の遅れのため、使用されなかった電荷が利用できなくなる。したがって、電池をしばらくの間、低い（または無）充電率で休止させることが許されると、一時的に低下した電圧が上昇する。最後に、温度もまた内部抵抗およびフル充電容量に影響を与える。温度が低いほど内部抵抗が高くなり、これによりフル充電容量が低下する。反対に、温度が高いと自己放電を引き起こし、供給される実容量が低下する。これらの特性に加えて、リチウムイオン電池にはないが、いくつかの電池、例えばNiCd電池には、メモリ効果があることが知られている。

【0016】

上述の電池容量の一時的変化とは別に、電池は、電解質の分解、活性物質の溶解、および不動態膜の形成を含む、望ましからぬ副反応によりその容量をある程度失って、内部抵抗が増加し最終的には電池セルの故障を引き起こすことがある。可能な故障のモードがいくつか存在し、電池セルの挙動を予測するのを難しくしている。第1に、開回路は、その開回路となった電池セルを含む直列鎖の中の他の電池セルに対しては、開回路はその他の電池セルへのさらなる損傷を制限することから、フェールセーフ・モードとなることができる。しかしながらこの故障モードは、その直列鎖中の全ての電池セルが開回路となり使用不能となるため、アプリケーションにとっては有益ではないかもしれない。第2に、異常に低い電気抵抗を有する短絡はほぼゼロの電圧降下を招き、電池パック全体（すなわち、一組の電池セル）は機能し続ける一方で、連鎖中の残りの電池セルはわずかに過負荷となる。最後に、爆発の可能性は、極端な高電流を検知し停止する保護回路を介して回避される。

【0017】

図1は再構成可能電池システム10の配置例を図示する。再構成可能電池システム10は一般に、互いに近接してまたは隣接して配置された複数の電池回路30a-30nを備える。各電池回路30a-30nは、関連する1つの制御モジュール20a-20nを有する。制御モジュール20a-20n（またはそれらの一部）でサポートされている複数の機能は、複数のコントローラに分割されることがあるように考察されるが、例示の実施例においては、制御モジュール20a-20nはコントローラ50により実現されている。ここで使用されているように、モジュールという用語は、特定用途向け集積回路（ASIC）、電子回路、1つまたは複数のソフトウェアまたはファームウェア・プログラムを実行する1つの（共有、専用またはグループ）プロセッサおよび／または（共有、専用またはグループ）メモリ、組み合わせ論理回路、および／または記述された機能を提供するその他の好適な構成部品を指し、あるいはそれらの一部であり、またはそれらを含んでよい。ソフトウェアまたはファームウェア・プログラムは、コンピュータ・メモリ内にあって、コンピュータ・プロセッサにより実行されるコンピュータ実行可能命令として実現されることを理解されたい。

【0018】

電池回路30a-30nは、1つの入力端子36a、1つの出力端子34a、および入力端子36aと出力端子34aとの間に挿入された1つの電池セル32aを含む。動的再構成の枠組みの設計は、任意の電池セルをバイパスすることができなければならないという原則により導かれる。加えて、コストを最小にし信頼性を向上するために、所与の電池セルの周辺には、できる限り少ないスイッチが置かれねばならない。例として示す実施例において、各々の電池回路はさらに、入力端子36aと電池セル32aの負極端子との間に接続された入力スイッチ38a（または、 S_I ともいう）、出力端子34aと電池セルの正極端子との間に接続された1つの並列スイッチ44a（または、 S_P ともいう）、電池セルの負極端子と隣接する電池回路の負極端子の1つとの間に接続されたバイパススイッチ40a（または、 S_B ともいう）、および電池セル32aの正極端子と上記隣接する電池回路の負極端子との間に接続された1つの直列スイッチ42a（または、 S_S ともいう）の4個のスイッチを含む。電池回路30a-30nは、以下にさらに説明するように電池システムが複数の端子を提供できるようにしている入力端子スイッチ46a-46n

および出力端子スイッチ 48a-48n（それぞれ S_{IT} および S_{OT} ともいう）で相互接続されている。特定のスイッチの配置について言及されているが、その他のスイッチ配置も本開示のより広い態様に含まれる。

【0019】

制御ユニット 20a-20n は、複数の電池回路内のスイッチを構成して、異なる回路配置を形成する。例えば、オンはそのスイッチに対して閉回路であり、オフはそのスイッチに対して開回路であるとして、入力スイッチ 38b をオフに設定し、直列スイッチ 42b をオンに設定し、バイパススイッチ 40b をオフに設定し、並列スイッチ 44b をオフに設定するように所与の電池回路 30b 内のスイッチを設定することにより、電池セルは直列配置に構成されよう。複数のセルが直列に配置される場合、セル 32b は、入力スイッチ 38b をオフに設定し、直列スイッチ 42b をオフに設定し、バイパススイッチ 40b をオンに設定し、そして並列スイッチ 44b をオフに設定するようにスイッチを設定することにより、バイパスすることができる。直列の列のどちらか一方の端において電池回路内のスイッチを異なるように構成して、それぞれのセルが直列鎖の中に組み入れられたり、またはバイパスされることは容易に理解されよう。

【0020】

電池セルを互いに並列に構成するためには、入力スイッチ 38b をオンに設定し、直列スイッチ 42b をオフに設定し、バイパススイッチ 40b をオフに設定し、そして並列スイッチ 44b をオンに設定するように所与の電池回路 30b 内のスイッチは構成される。同様に、並列グループのどちらか一方の端において電池回路内のスイッチを異なるように構成して、それぞれのセルを残りのセルに対して並列に置くことができることは理解されよう。複数のセルが並列に配置されている場合、所与の電池回路内の全てのスイッチをオフにすることでセルをバイパスすることができる。

【0021】

動的再構成可能電池システム 10 のアーキテクチャは、その各々が対応する電池セルの電圧および電流を読み取るセンサーアレイ $\{E_1, \dots, E_i, \dots, E_k\}$ を E として、 $\Psi = (E, F, S, D)$ と表現することが可能である。F は、いずれのセルがバイパスされるかを決定するためにコントローラが保持する、フィードバック・スイッチのアレイ $\{F_1, \dots, F_i, \dots, F_k\}$ を意味する。デバイス i の電池セルの故障が検知されると、 $(F_i, 0n)$ となる。S はスイッチのアレイ $\{S_1, \dots, S_i, \dots, S_k\}$ を示し、 S_i は $S_{i,I}$ 、 $S_{i,O}$ 、 $S_{i,B}$ 、 $S_{i,S}$ 、 $S_{i,P}$ 、 $S_{i,IT}$ 、および $S_{i,OT}$ で構成される。D は電池デバイスの組 $\{D_1, \dots, D_i, \dots, D_k\}$ である。これらのデバイスの接続は、 n_s を 1 つの直列鎖に接続される電池セルの個数、 n_p を並列に接続される直列鎖の個数とすると、 $n_s \times n_p$ 行列

【数 1】

$$\begin{pmatrix} D_{1,1} & \cdots & D_{1,n_p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n_s,1} & \cdots & D_{n_s,n_p} \end{pmatrix} \quad (1)$$

と考えられる。項 V_d および V_a はそれぞれ需要電圧と電池セル（または電池パックの組）の平均電圧を表す。需要電圧はアプリケーションにより指定されることは理解されよう。同様に、 (F_i) を表示関数、すなわち、もし $(F_i, 0ff)$ のときに、1 を返し、それ以外は 0 を返す関数であるとする、 f_N は

【数 2】

$$f_N = \sum_{i=1}^k I(F_i) \quad (2)$$

と定義される。

【0022】

動作中、所与の電池回路の制御ユニットはその電池回路内の電池セルの動作状態を監視し、その動作状態に基づき電池回路内のスイッチを制御する。例として示す実施例では、制御ユニット 20 a－20 n は電池状態を監視するために、2つのセンサ 54 a－54 n および 56 a－56 n と通信する。例えば、制御ユニット 20 a－20 n は充電状態（SOC）の変化とその電池セルの電圧を、センサデバイス 54 a－54 n および 56 a－56 n を介して監視する。1つの電池セルの SOC は、電池セル 32 a－32 n に流入および流出する電流を時間とともに測定し積分する、いわゆるクーロン・カウント（Coulomb count）で推定されよう。実際には、電圧および温度もまた、電池の変数として解釈されるであろう。したがって、クーロン・カウントの内容に基づく関数 $f_{V,T}(SOC, \int I dt)$ は SOC を返す。一方、一般に、直接の電圧測定は、放電率と温度に対する依存性のため、指標として使用するためには精度が不十分である。いくつかの実施例では電圧はカルマンフィルタを用いて推定されるかもしれない。あるいは、統合再帰関数 $f_{V,T}(SOC, \int I dt)$ が与えられ、 $[V, SOC]$ を返すと仮定するかもしれない。電池セルの充電状態および／または電圧を決定するその他の技術もまた、本開示の範囲内である。電池状態を監視するために異なるタイプのセンサが使用できることは容易に理解されよう。

【0023】

周期的な監視間隔（ Δt ）において、コントローラ 50 は、各々の電池セルの SOC を対応する制御ユニット 20 a－20 n を介してチェックし、 δ が SOC の最大変動の限界を定める閾値を表すとして、次式

【数 3】

$$\frac{\min(SOC_1, \dots, SOC_k)}{\max(SOC_1, \dots, SOC_k)} < \delta \quad (3)$$

が成立すると、ローテーション事象（rotation event）のトリガを掛ける。 δ が大きくなるほど、電池セルはより不均衡となる。さらに、 Δt が大きくなるほど変動も大きくなるため、この変動は Δt とともに δ で調整する必要がある。特に、 Δt は放電率に反比例する。ローテーション事象は、セルを健全に維持する目的で健全な電池セルを別の健全な電池セルで交替させる、電池パック内での調整である。

【0024】

議論の目的のために、故障したセルを公称容量の 80% にしか充電できない、および／または、フル充電状態でカットオフ電圧ほどの低い電圧しか有さない電池セルとみなすとする。例えば、電池セル i が故障したと判定されると、制御ユニット i の中で (F_i, On) となる。故障したセルを判定するための別の基準もまた考えられる。

【0025】

各監視間隔（ Δt ）において、コントローラ 50 はまた平均電圧をチェックし、 α が電圧不均衡の上限を規定するとして、次式

10

20

30

40

【数 4】

$$V_d \leq V_a \cdot n_s \leq V_d + \alpha \quad (4)$$

が成立しない場合、再構成事象（reconfiguration event）のトリガを掛ける。 α は供給電圧の粗さに基づいて調整されることが観察できる。再構成事象により、コントローラは電池回路のトポロジーを変化させる。再構成事象は一般に、1つの電池セルが故障したと判定される際に発生する。再構成事象はまた、追加のアプリケーションが電圧供給を要求し、これにより複数端末構成が要求される際にも発生する。他のタイプの再構成事象のトリガもまた、本開示で意図されている。

10

【0026】

電池セルの故障または別の再構成事象のトリガを掛ける事象の際には、セマンティック・バイパス・メカニズム（semantic bypassing mechanism）により電池の接続が構成される。一般に、セマンティック・バイパス・メカニズムは、直列鎖の並列グループ間の電圧の均衡を遵守しながら、広範囲の電圧を供給する方針を実現する。本開示ではその他の方針も意図されているが、例として示す実施例において、2つの方針がセマンティック・バイパス・メカニズムで実現されている。このセマンティック・バイパス・メカニズムはコントローラで実現されている。

20

【0027】

まず、定電圧維持の方針は、電池セルの故障にもかかわらず電池寿命にわたって供給電圧を可能な限り一定に保持するよう指定される。この目的のために、故障した電池セルを含む直列鎖はバイパスされる。しかしながら、直列鎖中の使用されているおよび使用されていない両方の健全な電池セルの電圧は、時間経過とともに乖離し、結果として直列鎖中の電池セル間の電圧不均衡をもたらす可能性がある。このため、監視中にローテーション事象にトリガが掛けられ、電池セルの接続の再構成がなされる。接続の再構成に対して、SOCが最も低いレベルの電池セルが最初に選出される。

【0028】

図2は定電圧維持の方針の下での直列鎖内の電池セルの再構成を図示する。図2には、2つの構成60aおよび60bが描かれている。第1の構成60aにおいて、最後の4つの電池セルが直列に接続されている。第2の構成60bにおいては、コントローラ52は中間の4つの電池セルを定電圧維持の方針に基づき、直列に接続している。見て分かるように、健全な電池セルが交替されて、これにより電圧が一定に保たれている。図から分かるように故障したセル62は両方の構成で除外されている。

30

【0029】

定電圧維持の方針を実現するために、コントローラ52は何個の電池セルがバイパスされるべきかを決定しなければならない。バイパスされる電池セルの個数は、次のように計算される。 V_d が与えられると、まず、 n_s が $\lceil V_d / V_a \rceil$ で計算され、 V_a を使用することで寿命中の非線形電圧降下が差し引きされる。次に、 $f_N(\Psi)$ は利用可能な電池セルの総数を示し、これを返すすると、 n_p が $\lceil f_N(\Psi) / n_s \rceil$ から導かれる。この式は $(f_N(\Psi) - n_s \cdot n_p)$ 個のバイパスされるべき健全なセルを導き出す。この手順が周期的な間隔 (Δt) または再構成事象の開始により繰り返される。

40

【0030】

あるいは、所与の利用可能電池セルに対し、単一の電池セルの電圧に相当する電圧降下を犠牲にしても、必要とされるだけの多くのアプリケーションをサポートし、最大の供給可能電力を改善するよう、動的電圧許容の方針が定義されている。動的電圧許容の方針の下では、直列鎖内の1つ以上の健全な電池セルが、図3に示すように選出されることがある。この方針を適用するために、 n_p はアプリケーションの要求にしたがい固定されたままとなり、次に n_s が $\lceil f_N(\Psi) / n_p \rceil$ で計算され、その結果、 $(f_N(\Psi) - n_s \cdot n_p)$ 個のバイパスされるべき健全なセルが得られる。定電圧維持の方針と同じく

50

、電池セルはそれらのSOCに基づいて選び出される。同様に、この手順は周期的な間隔(Δt)または再構成事象の開始により繰り返される。

【0031】

これらの2つの方針は以下に示されている事例からさらに理解されるであろう。各々が4個の直列の電池セルを有する3つの並列グループを仮定すると、○が対応するセルのいずれかが使用されているかを示している場合に、その構成は、

C1 (○), C2 (○), C3 (○), C4 (○)
C5 (○), C6 (○), C7 (○), C8 (○)
C9 (○), C10 (○), C11 (○), C12 (○)

と表現される。各セルの電圧が1Vに等しく、各直列の列は4Vを出力すると仮定する。C6とC8が故障したと仮定すると、グループ間の電圧をつりあわせるために、他のグループの2つのセルを休止しなければならず、×が対応するセルが故障し、ーがそのセルが休止していることを示すとすれば、結果として、次の構成となる。

C1 (○), C2 (○), C3 (ー), C4 (ー)
C5 (○), C6 (×), C7 (○), C8 (×)
C9 (○), C10 (○), C11 (ー), C12 (ー)

【0032】

セマンティック・バイパス・メカニズムは、前記2つの方針の1つにしたがって、電池の接続を再構成する。定電圧維持の方針が適用される場合(すなわち、需要電圧は4Vである)、構成結果は

C1 (○), C2 (○), C3 (○), C4 (○)
C5 (○), C6 (×), C7 (○), C8 (×), C9 (○), C10 (○)
C11 (ー), C12 (ー)

となり、この構成による電力出力は $4V \times 2 (= 8P)$ である。

一方、動的電圧許容の方針が適用される場合、構成結果は

C1 (○), C2 (○), C3 (○),
C4 (○), C5 (○), C6 (×), C7 (○),
C8 (×), C9 (○), C10 (○), C11 (○), C12 (ー)

となり、この構成による電力出力は $3V \times 3 (= 9P)$ である。この動的電圧許容の方針では、並列グループの数(n_p)は変更されていない。その代わり、出力電圧を n_s で調節することにより供給可能な電力は増加することがある。

【0033】

これら2つの方針は電池の有用性を最大化する上で相補的である。特に、アプリケーション固有の負荷需要にしたがえば、必要な場合は常に、定電圧維持の方針が適用される。例えば、ダイナミック・ボルテージ・スケーリング(dynamic voltage scaling)をサポートしているシステムは、需要が低いときにはそのシステム電圧を低下させる。これを行うために、システムはしばしば降圧DC-DC変換器を使用する。DC-DC変換器は変換の際にエネルギーを消費する。この場合、DC-DC変換器を使用する代わりに、再構成可能システムに定電圧維持の方針を適用することにより、さらなる省エネルギーが可能である。その一方で、動的電圧維持の方針は複数のアプリケーションが同時に収容されるような場合に適用される。異なる電圧と電力を要求するアプリケーションは特定の容量を必要とし、そのため、必要な並列グループの数 n_p を定義して、それらが固定される。

【0034】

ひとたび n_s と n_p が適用された方針にしたがって決定されると、コントローラ50は、所望の回路構成を達成するために、1つの接続構成アルゴリズムを適用する。構成アルゴリズムの一例を以下に示す。

Config (F, ns, np):

$f \leftarrow \text{find}(F \neq 1, F=TB+PB);$ /* 使用可能なセルを検索 */

$k \leftarrow f[1];$ /* 最初の利用可能セルを選択 */

for $i \leftarrow 1 : np$

Signal ($S_{k,l}, On$); /* 並列接続グループを開始 */

while $Fk = 1$ /* F 内の k 番目のビットが1か否かチェック */ 10

Signal ($S_{k,B}, On$); /* セル k をバイパス */

$k \leftarrow k + 1;$

end while

Signal ($S_{k,S}, On$); /* セルを直列に接続 */

$j \leftarrow 1;$

while $j < (ns - 1)$ 20

$k \leftarrow k + 1;$

while $Fk = 1$

Signal ($S_{k,B}, On$); /* セル k をバイパス */

$k \leftarrow k + 1;$

end while

Signal ($S_{k,S}, On$); /* セルを直列に接続 */ 30

$j \leftarrow j + 1;$

end while

Signal ($S_{k,P}, On$); /* 並列接続グループ終了 */

end for

接続構成アルゴリズムはシステム内のどのセルが利用可能かを判定するところから始まる。k番目のローカル制御ユニットがセルの故障をコントローラに報告すると、コントローラはそのデータ構造PBを更新し、PB(k)を1に設定してその故障したセルを永久にバイパスするが、ここでPBは、電池セルの総数に等しい大きさのビット・ベクトルであり、kはそのビット・ベクトルのk番目のビットである。セルの故障が発生すると、各並列グループ内の健全なセルを活動停止にする、すなわちそれを一時的にバイパスする必要が生じる。この意図的なバイパスは、PBのサイズに等しいビット・ベクトルであって、一時的バイパスのためのもう一つのデータ構造であるTBを保持しているコントローラによって追跡されている。

【0035】

最初の利用可能セルから始めて、1つの並列接続されるグループがこのアルゴリズムによって構築される。各々のセルが順に評価される。不健全なまたは故障したセル、またはTBによって表されている健全なセルはバイパスされる一方で、健全なセルは直列に接続

40

30

50

される。この手順は n_s 個の健全なセルが直列に接続されるまで繰り返され、1つの並列接続されたグループを形成する。処理工程は次の並列接続されるグループに移り、この手順を n_p 個の並列接続されるグループが形成されるまで、繰り返す。所望の回路配置を達成するようにセルを接続するために、別の手順を用いてもよいことも考慮されている。

【0036】

理想的なセルとは違って、セルの出力電圧はその放電期間を通して一定ではない。すなわち、 $n_s \times V_a$ は非線形に降下して、 V_d から外れる。この偏差は DC-DC 変換器を用いて対処できる。しかしながら DC-DC 変換器は熱の発生という形でエネルギーを浪費する。このエネルギー浪費は、 $EFF_{DC-DC} = (I_{OUT} \times V_{OUT}) / (I_{IN} \times V_{IN})$ で与えられる DC-DC 変換器の変換効率 (EFF_{DC-DC}) で測定され、ここで I_{IN} および V_{IN} はそれぞれ、DC-DC 変換器への入力電流および電圧であり、 I_{OUT} および V_{OUT} はそれぞれ、その出力電流および電圧である。 EFF_{DC-DC} は、入力変動が激しくない場合およそ 75% から 95% の間と近似でき、DC-DC 変換器は、入力電圧が出力電圧に最も近いときに、最も効率的である。電力損を最小とすように、再構成の適切な時点を見つけることは重要である。電力の関数 $f_{DC-DC} : V_{IN} \times V_{OUT} \rightarrow EFF_{DC-DC}$ を定義する。すると、電力損は $PD = (1 - f_{DC-DC}(V_{IN}, V_{OUT})) \times V_{IN} \times I_{IN}$ で与えられる。ひとたび V_{IN} が決定されると、定電圧維持の方針が適用される。

10

【0037】

電力損を最小とすために、セルの接続を再構成して、 V_{IN} を V_d に調整する。再構成のオーバーヘッドが切り替えのオーバーヘッドに制限されると仮定すると、この切り替えのオーバーヘッドは信号をスイッチに送信し、そのスイッチをオン／オフするための電力消費を含む。このオーバーヘッドは離散時間ではほとんど変動しないので一定と近似され、結果として連続時間でのエネルギー浪費に比較すると無視できる量の電力損となる。コントローラは、先験的な電力損が切り替えのオーバーヘッドを含む事後的な（再構成後の）電力損よりも大きいとき、すなわち次の条件

20

$$(1 - f_{DC-DC}(V_c, V_d)) \times P_c \Delta t_c > (1 - f_{DC-DC}(V_d^*, V_d)) \times P_d^* \times \Delta t_c - \alpha \times P_d^*$$

を満足するときは常に、自立的にセル配置を構成するが、ここで、 V_c は先験的端子電圧を、 V_d^* は需要電圧 V_d の推定値を表し、 α は切り替えのオーバーヘッドである。 V_d^* を用いてコントローラは n_s と n_p を再計算する。この判断基準によりコントローラはリアルタイムにセルの接続を自律的に再構成することが可能となる。

30

【0038】

上述のアーキテクチャは、各々の電池パックが以上に記述した再構成可能電池システム 10 を備える、複数の電池パックに拡張できるであろう。換言すれば、各々の電池パックは複数の電池回路とそれらの電池回路の動作を制御する 1 つのローカルコントローラとを備えている。この拡張されたアーキテクチャはさらに、各々のローカルコントローラとデータ通信を行って、電池パック間の機能の統合調整を行う 1 つのグローバルコントローラを含む。動的再構成の枠組みを複数の電池パックへ拡張することは $\gamma = (E, F, S, \Psi)$ で表され、ここで $\Psi = \{\Psi_1, \dots, \Psi_2, \dots, \Psi_k\}$ である。各々の Ψ_i はそれぞれのローカルコントローラを介して構成される一方、 γ はローカルコントローラと連携するグローバルコントローラにより構成される。前述した 2 つの方針はグローバルコントローラにおいて実現可能であり、またこれにより適用される。

40

【0039】

グローバルコントローラは γ 内の電池セルをローカルコントローラと連動して再構成し、負荷に対して広範囲の供給電圧を発生させる。 V_d が与えられると、グローバルコントローラは Ψ_k および γ において直列に接続されるべき電池セルの数を、

【数 5】

$$n_s \cdot N_s \equiv \left\lceil \frac{V_d}{V_a} \right\rceil, \quad (5)$$

と計算するが、ここで $n_s \leq f_N(\Psi_k)$ は Ψ_k 内の 1 つの直列鎖内の電池セルの個数であり、 $N_s \leq f_N(\gamma)$ は γ 内の 1 つの直列鎖内の電池セルの個数である。この式は、 $f_N(\Psi_k) \leq f_N(\gamma)$ の場合は $n_s \leq N_s$ 、あるいは、 $f_N(\gamma) \leq f_N(\Psi_k)$ であれば $N_s \leq n_s$ という条件で成立する。その条件の下で n_s および N_s が解かれた後、 Ψ_k 内の n_p が $\lceil f_N(\Psi_k) / n_s \rceil$ で計算される。同様に、 γ 内の N_p (並列に接続されている直列鎖の数) が $\lceil f_N(\gamma) / N_s \rceil$ で計算される。結果として、ローカルコントローラおよびグローバルコントローラはそれぞれ引数 (Ψ , n_s , n_p) および (γ , N_s , N_p) を用いて接続構成アルゴリズムを適用し、その結果、電池パック内外の全ての電池セルが連携して構成される。

【0040】

複数の電池パックが並列に配置される際に、仮にある電池パックが故障した電池セルを含む場合、その電池パックの 1 つをバイパスする必要があるであろう。ローカルコントローラと同様に、グローバルコントローラは (F_i , 0n) が検出されると、 Ψ_i を故障と判定する。しかしながら、 Ψ_i が単純にバイパスされると、 Ψ_i 内のいくつかの電池セルは使用できなくなる。この問題を解決するために、グローバルコントローラはパックレベルのバイパス決定アルゴリズムを実行する。このアルゴリズムでは、グローバルコントローラは、 n_m で表される、パック全体に渡って利用可能なセルの最小数を求め、次に、 n_m の以前の値に基づき、各々のパック内で何個のセルがバイパスされるかを計算する。この判定は下記の判定機能を介して、グローバルコントローラにより系統的になされる。

$$Y = \{f_N(\Psi_1), \dots, f_N(\Psi_k)\}; B=0;$$

Battery-Pack Bypassing Decision (Y, B):

$$n_m \leftarrow \min(Y); \quad /* \text{パック内のセルの最小個数} */$$

$$n_{pb} \leftarrow |\{\Psi_i \mid n_m = f_N(\Psi_k)\}| \quad /* n_m \text{を有するパックの数} */$$

$$n_b \leftarrow \Sigma(Y - n_m); \quad /* \text{バイパスされ得るセルの合計} */$$
if $n_b \geq (n_m \times n_{pb} + B)$

Battery-Pack Bypassing Decision

$$(Y - \{\Psi_i \mid \text{for all } k, n_m = f_N(\Psi_k)\}, n_m \times n_{pb});$$
else**return** n_m ;**end if**

【0041】

この判断機能をより良く理解するために 2 つの例を提供する。第 1 の例において、それぞれ最初に 6 個のセルを有する 4 個の電池パックが存在すると仮定する。すなわち、 $[6, 6, 6, 6]$ である。パック 1、2、および 3 において、それぞれ、1 個、2 個、および 2 個のセルが故障した場合 ($[5, 4, 4, 6]$ で表される)、 $n_m = 4$ を得る。各々のパック内でバイパスされるセルの数 (n_b で表される)、すなわち (1、0、0、および 2) の合計は $n_m \times 2$ よりも小さいので、このアルゴリズムはパック 2 および 3 をバイパスしない。その代わりに、パック 1 内の 2 個のセルおよびパック 4 内の 1 個のセルをバ

イパスするように決定する。第2の例においては、 $[4, 2, 3, 6]$ と仮定する。この例において、 $n_m = 2$ である。 $n_b = 7$ （すなわち、 $2 + 0 + 1 + 4$ ）は n_m よりも大きいので、パック2はバイパスされ、その結果 $[4, 3, 6]$ となる。このステップにおいて、 $n_m = 3$ である。 $n_b = 4$ （すなわち、 $1 + 3$ ）は $n_m + n_m^*$ （以前の n_m ）よりも小さいので、このアルゴリズムは n_m （すなわち最新の n_m ）を返す。したがって各パックは n_m に基づいてそのセルをバイパスする。すなわち、パック1、2、3、および4において、それぞれ、1個、2個、0個、および3個のセルがバイパスされる。この様にして、グローバルコントローラは電池パックをいつ、どの様にバイパスするか決定することができる。各々のパック内のローカルコントローラが n_m の最新の値をグローバルコントローラから受け取ると、各ローカルコントローラは n_m に基づき定電圧維持の方針を適用する。

10

【0042】

上記の再構成可能な枠組みはまた、どのアプリケーションも電池システムから電力を必要とする複数のアプリケーションをサポートするためにも使用可能である。例えば、自動車の中で、スターター・モータ、ワイパー、およびラジオは全て電池システムから電力を必要とすることがある。各々のアプリケーションは出力電圧の要求 V_d を定め、優先順位が割り当てられるかもしれない。アプリケーション k のための出力電圧の要求 V_d は、その要求を満たすのに必要な直列接続されるセルの個数 $N_{s, k}$ を決定する。 $N_{p, 1}, N_{p, 2}, \dots, N_{p, k}$ の合計は、健全な電池セルの総数を与える。 $N(\gamma)$ は、全てのアプリケーションに対して、 q 個の並列グループを導く。

20

【0043】

そして、電池セルは要求するアプリケーションの各々に対して割り当てられることができる。もし、アプリケーションの要求に適合するために必要とされる電池セルの個数が使用可能なセルの個数を超えるならば、これらのアプリケーションに割り当てられた優先順位に基づき、利用可能な電池セルがアプリケーションに割り当てられる。使用可能な電池セルの個数が、アプリケーションの要求に適合するために必要とされるセルの個数を上回るときは、コントローラは残りのセルを割り振ることができる。いずれの場合も、利用可能な電池セルは最初に、優先順位の高いアプリケーション、すなわち高い需要電圧のものに分配される。この分配は、残っているセルが分配するのに足りなくなるまで継続される。割り振り方針の例が下記に定められている。

30

Multi-Terminal-Based Grouping:

$/^* \{N_{s,1}, \dots, N_{s,i}, \dots, N_{s,k} \mid N_{s,1} > \dots > N_{s,i} > \dots > \dots N_{s,k}\} ^*/$

$[N_{p,1}, \dots, N_{p,i}, \dots, N_{p,k}] \leftarrow 1$

$q \leftarrow \left\lfloor \frac{N(\gamma)}{N_{s,1} + \dots + N_{s,i} + \dots + N_{s,k}} \right\rfloor;$

for $j \leftarrow 0;$

if $(fN(\gamma) - q \sum_{i=1}^k N_{s,i}) < \sum_{i=1}^J N_{p,i} \cdot N_{s,i}$

$N_{p,j} \leftarrow 0;$

end if

end for

$[N_{p,1}, \dots, N_{p,i}, \dots, N_{p,k}] \leftarrow [N_{p,1}, \dots, N_{p,i}, \dots, N_{p,k}] + q;$

return $[N_{p,1}, \dots, N_{p,i}, \dots, N_{p,k}]$

10

20

このようにして、コントローラは $N_{s,k} \times N_{p,k}$ 個の電源を各アプリケーション k に割り振る。拡張された再構成可能な枠組みの場合は、この割り振り方針はグローバルコントローラによって実現される。

【0044】

ひとたび電池セルが割り振られると、それにしたがって、1つまたは複数のコントローラは電池システムを構成する。まず、割り振られた電池セルを有する各々のアプリケーション用に入力端子および出力端子を提供するように、電池システムが構成される。そうするために、入力端子スイッチ $46a-46n$ および出力端子スイッチ $48a-48n$ が、複数の端子を提供するように制御される。例えば、入力端子スイッチ ($S_{i,I}, 0n$) および出力端子スイッチ ($S_{i,P}, 0n$) が全ての電池回路 $30a-30n$ に対して変化しない場合、電池パック用のインタフェースは単一の入力端子と単一の出力端子を有する。この逆に、電池回路 $30a-30n$ を区分けして複数の端子を用意するには、選択された入力端子スイッチと出力端子スイッチはオフに設定することができる。そして、各アプリケーションの区分けに対して、電池システムが、そのアプリケーションの要求に適合するように、先に説明したセマンティック・バイバシング・メカニズムを用いて構成される。

30

【0045】

例えばEVおよびHEV用の大規模電池セルは、 n_s 個の電池セルを直列に接続して要求された供給電圧を提供し、 n_p 個の並列グループが並列に接続されて電流 (I) の流れを決定し、結果として要求された容量となるようにパックされる。この容量は、電池の非線形性のために、 T を放電時間 (電池寿命) として、理想的な電池容量式

40

【数6】

$$C \equiv T \cdot I, \quad (6)$$

から単純に導くことはできない。その代わり、経験的なポイカート (Peukert) の関係は、定電流負荷の場合の非線形性を、経験的パラメータを導入することにより $C \equiv T$

50

・ I^α とモデル化しているが、ここで $\alpha > 1$ はポイカート値と呼ばれ、これは一般に、1.2と1.4の間の値を取る。

【0046】

再構成可能電池管理システムの目的のためには、この非線形性は電流の流れの離散化 (discretization) を用いてモデル化することができよう。すなわち、実世界のシステムは時間経過で変動する負荷により特徴づけられる。そのような変動負荷は、M個の電流レベル ($i_1, \dots, i_M$) の組で表される区分的な定負荷で近似することができ、この中でMは負荷を特徴づけるために使用され、全動作時間Tの断片である量子化間隔 Δt ($\equiv t_i - t_{i-1}$) で決定される。すなわち、 $I_A(t)$ を指標関数とし、 $I_i(t) \equiv \sum_{i=1}^M i_i \cdot 1_{[t_{i-1}, t_i]}(t)$ である。よって、 Δt が小さいほど、負荷の特徴付けの精度が高くなる。 $\Delta t \equiv T$ の場合、負荷は一定である。負荷のパターンは経験的測定値から得ることが可能であり、結果として、1つの電池セルまたは複数の電池セルから成る1つのパックの放電プロフィールが得られる。したがって、式(6)のモデルは

10

【数7】

$$C = T \cdot I_i(t). \quad (7)$$

と一般化される。

【0047】

20

全負荷は個々の並列グループの負荷となる電流の合計であり、すなわち $I = I_1 + \dots + I_i + \dots + I_{n_p}$ であって、これはある時点では、ある許容可能な食い違い閾値内で均一に分布しており、 $I = n_p \cdot I_i$ となる。この結果、

【数8】

$$C = T \cdot \frac{I(t)}{n_p}. \quad (8)$$

となる。

30

【0048】

セルの故障が発生すると、 $N(t)$ を時刻 t で電池セルアレイ内に発生する故障の総数とすると、利用可能な並列グループの数は $n_p - N(t)$ に等しくなる。ABSにおいて、利用可能な並列グループの個数は

【数9】

$$n_A \equiv n_p - \left\lceil \frac{N(t)}{n_s} \right\rceil, 0 \leq N(t) \leq n_p \cdot n_s \quad (9)$$

40

と定義される。

【0049】

バラバラな時間間隔で生じるこれらの故障の数は独立であるから、 $N(t)$ は電池セルの故障率 λ で分布するポアソン分布にしたがう。よって、時刻 t までに発生するセルの故障の平均総数は t に比例し、結果として $\lambda \cdot t$ となる。この式を式(9)に適用すると

【数 1 0】

$$C = T \cdot \frac{I(t)}{n_A} \equiv T \cdot \frac{I(t)}{n_p - \left\lceil \frac{\lambda - t}{n_s} \right\rceil}, \quad (10)$$

を得るが、ここで

$$t < \frac{n_p \cdot n_s}{\lambda} \leq T \quad 10$$

である。

【0 0 5 0】

一方、従来手法では、動作する電池セルの直列鎖の負荷は、 n_p 個の並列グループ全体でのセルの故障の総数に比例して増加し、

【数 1 1】

$$n_L = \begin{cases} n_p - N(t), & 0 < N(t) < n_p \\ 0, & n_p < N(t) \leq n_p \cdot n_s \end{cases} \quad (11) \quad 20$$

【0 0 5 1】

負荷の線形的な増加は、故障したセルが存在する直列鎖の中のあらゆる健全な電池セルが再利用できないためである。そこで、従来手法にしたがうと、利用可能な容量は、

【数 1 2】

$$C \equiv T \cdot \frac{I(t)}{n_L} \equiv T \cdot \frac{I(t)}{n_p - \lambda \cdot t}, \quad (12)$$

と計算されるが、ここで

$$t < \frac{n_p}{\lambda} \leq T$$

である。したがって、 λ が高いほど、従来手法に対して寿命の増大が大きくなり、これはまた、直列の電池セルの個数 n_s に反比例する。

【0 0 5 2】

電池セルの接続の構成に基づいて、先に説明した 2 つの方針のいずれかが適用される。電池セルの稼働率を最大にするために、全電池セルが供給する電力の容量が、2 つの方針を比較する判断基準として選ばれる。 $m \times n$ 行列が直列鎖内の n_s 個の電池セルの組み合わせを表し、 n_p 個の並列グループが存在するとすると、行列内の電池セルのあらゆるの要素は他のものとは独立に故障すると仮定されている。例えば、1 つの電池セルが故障した場合、動的電圧許容の方針に基づけば、 $(n_s - 1) \cdot n_p$ の電力が供給される。定電圧維持の方針に基づけば $n_s \cdot (n_p - 1)$ の電力となるが、簡単のために、各電池セルの構成要素は 1 ボルトで 1 アンペアの能力があると仮定する。すると、方針を選択する分岐点は $n_s = n_p$ のときと分かる。複数の電池セルが故障したときには、故障したセルの迂回のために使用されずに残される電池セルの個数は、容量の尺度を反映する。換言すると、行列内で故障したセルについて数えた行の数 (c) の、列の数 (w) に対する比率 (r) を、行列の全体の大きさと比較することで、判定を行う際の因子となり得る。そこで 40 50

、分岐点は

【数 1 3】

$$r \equiv \frac{c}{w} \equiv \frac{n_p}{n_s}, \quad (13)$$

と判断され、したがって、

$$r > \frac{n_p}{n_s}$$

10

のとき、動的電圧許容の方針が選ばれ、定電圧維持の方針よりも多くの電力容量が提供される。

【0053】

最初に評価方法を説明し、続いて記述されたアーキテクチャの性能を、電池セルの接続をオンラインで構成することのできない従来の手法と比較して評価する。電池性能の評価に使用される指標には、電池寿命と供給電圧が含まれる。供給電圧は供給可能な電力を定める一方で、寿命は電池セル／パックの総容量に比例する。電池の動特性は、複数の電池のシステムを設計するために広く使用されている、デュアルフォイル (Dualfoil) を用いてシミュレーションされた。デュアルフォイルのさらに詳しい説明は、非特許文献 1 を参照されたい。デュアルフォイルは、電池の接続が動的に再構成される方法を論証するのに十分である。

20

【0054】

再構成の枠組みは効果的に電池セルの故障の影響を「隠す」 (mask) ので、電池の寿命を延ばすが、従来の手法は電池容量の損失を著しく被り、したがって、寿命が短くなる。電池寿命は、最大供給可能電力とその電池パックから絶え間なく引き出せる電流量とにより計算される。明らかに、電池セルの故障が多いほど、電池寿命の減少はより大きい。図 4 は電池寿命の比較結果を図示する。明らかに、従来の手法は、故障した電池セルの個数が増えるにしたがって、期間のかなりの量を失っている。この理由は、1 つの電池セルの故障は、結果としてその故障した電池セルを含む直列鎖を失うことになるからである。これに対して、再構成の枠組みではその直列鎖内に残っている健全な電池セルをバックアップ・セルとして再利用する。したがって、別の鎖内で電池セルのさらなる故障が起きたとしても、それらは生き残っている健全な電池セルで置き換えられる。図 4 は提案された再構成の枠組みの耐障害能力を示している。例えば、 $\lambda \cdot t \equiv 6$ から 9、および $\lambda \cdot t \equiv 12$ から 15 のとき、電池パックの寿命は電池セルの故障の数の増加にもかかわらず、一定に保たれている。この 2 つの機構間の寿命差は、電池セルの故障の頻度が高くなるにつれて、大きくなっている。図 5 から分かるように、再構成の枠組みで達成される寿命の増大は、各並列グループ内の直列鎖内の電池セルの個数 (n_s) が増えると大幅に大きくなり、このようにしてバックアップ電池セルの利用可能性を強める。これは 2 つの電池セルを直列に接続した場合 (すなわち $n_s = 2$) でさえも効果的であり、5 倍の利得が得られる。明らかに、連鎖内の電池セルが多くなるほど、その増大も大きくなる。

30

40

【0055】

動的電圧許容の方針は、供給可能電力を最大に保ちながら、異なるアプリケーションからの広範囲な供給電圧需要に応じることを目的としている。図 6 は、25 個の電池セルのパックから得られる需要電圧と対応する最大供給可能電力の変化を図示しており、この電池セルのパックは各電池セルの実供給電圧および容量が、2.5% のジッタを許容したときに、それぞれ 3.6 ボルトと 1.3 アンペア時のものに基づいている。したがって、最大供給可能電力は、推定される 114 W と 120 W の間に入る。この電力は、各々のグループ内の 5 個の電池セルの直列鎖と、5 つの並列グループとの組み合わせ (すなわち、(5, 5))、または 25 個の電池セルを直列にした 1 つの並列グループ (すなわち (25,

50

1))で供給できる。興味深いことに、図6の円で囲まれたグループに対応する良好な範囲の供給電圧が、最大供給可能電力をかなり一定に保ちながら提供されている。これは、電池接続を適切に変えさせることにより、内在的なアプリケーションの需要を満たしつつ、電池セルの稼働率を改善できることを意味している。一方、(9, 2)または(13, 1)の接続は、電池セルの稼働率に関しては非効率であるように見える。しかしながら、任意の電池セルの故障または電圧降下はそれらをバックアップ電池セルで実質的に置き換えることで解決し、要求される電圧レベルを維持することができる。

【0056】

動的電圧許容および定電圧維持の方針は、共に供給可能電力を最大に保ちながらではあるが、前者は広範囲の供給電圧の需要を満足する狙いであり、一方後者は電池の故障または電池寿命の間に想定される電圧降下に対して供給電圧の許容範囲を持続するためという、異なる目的のために考案されている。よって、2つの方針は供給可能電力に関して比較することができる。図7は、定電圧維持および動的電圧許容の方針の間での電力強度の分布を示す。電池の接続において、 $n_s > n_p$ のときに動的電圧許容の方針が最大供給可能電力を供給する上で効果的であり、一方 $n_p > n_s$ のときに定電圧維持の方針がより良い選択である。この理由は、使用されていない電池セル/パックの稼働率にある。明らかに、分岐点は $n_s = n_p$ のときに生じる。

【0057】

先に述べたように、電圧降下は避けられないので、供給電圧を監視しながら供給電圧を需要電圧以上に保つように定電圧維持の方針が適用される。この監視間隔(Δt)は、電圧降下が需要未滿に低下することでシステムが影響を受ける程度に直接関係する。監視の頻度が高くなるほど、アプリケーションが影響を受ける時間が短くなるが、監視のオーバーヘッドが大きくなる。図8Aは、700個の電池セルのパックの寿命中の2つの異なる放電率での供給電圧の変化を示す。各電池セルは、4.3ボルトの出力電圧および1.3アンペア時の公称容量を提供するという構成でシミュレーションされているリチウムイオン電池の放電分布にしたがって、互いに独立に放電されていると仮定されている。アプリケーションの需要電圧(V_d)は600ボルトと想定されている。電池パックがCの速度で放電されている場合は、図8Bにおいて、電池パックが $\Delta t (= 10)$ 毎に監視されているとき、供給電圧が V_d 未滿に低下するのが10番目の時間間隔で検出され、電池パックの接続を、直列鎖に143個の電池セルを具備した4つの並列グループ、すなわち(143, 4)に再構成し、推定604ボルトを提供する。速度C2の場合、図8Cにおいて、内在するアプリケーションは正常の放電率のときよりも5倍の電池容量の喪失の影響を被る。特に、供給電圧がより急速に低下すると、供給と需要の電圧の間の差がより大きくなる。この状況は、監視間隔($\Delta t = 10$)を短くすることで改善できる。図8Dから分かるように、監視間隔を半分($\Delta t = 5$)にすると、電圧降下の定時検出は67%改善される。

【0058】

別の再構成可能な電池システム90の例を図9に関連して説明する。電池システム90は、大きく、1つのグローバル電池管理システム(BMS)91と複数のローカルBMS 94a-94mで構成されている。グローバルBMS 91はグローバルコントローラ92と電流計93とで形成されている。ローカルBMS 94a-94mの各々は、1つのローカルコントローラ101、1つの電圧センサ102、1組のアレイレベルのスイッチ103、104、105、および、1つまたは複数の電池セルを有する1つの電池セルアレイ106で形成されている。各ローカルコントローラ101は、対応する電池セルアレイ106内の複数のセルの電池状態、たとえば電圧、温度、充電状態(SoC: state-of-charge)および健康状態(SoH: state-of-health)を監視し、また同様に対応する電池セルアレイの動作を管理する。

【0059】

グローバルBMS 91とローカルBMS 94a-94mはデータバス96で相互接続されている。データバス96はデータおよびクロックラインから成り、これを介してグロ

10

20

30

40

50

ーバルコントローラ 92 およびローカルコントローラ 101 は互いに通信する。電池システム用の充電器 97 および／または負荷 98 もまたデータバス 96 に接続されている。例として示す本実施例において、データバス 96 はシステム管理バス（SMBus：System Management Bus）プロトコルに基づいて実装されている。したがって、メッセージはデータライン SMBDAT を通して交換される。1つのメッセージは、アドレス、命令型式、制御、およびデータ・ビットを含む。クロックライン SMBCLK は、データライン SMBDAT 上を送られるメッセージと連携して、通信の開始および終了を示すために用いられる。すなわち、SMBCLK 高での SMBDAT 上の高から低への立ち下がり変化は開始条件を示し、SMBCLK 高での SMBDAT 上の低から高への立ち上がり変化は停止条件を示す。さらに、これには、クロック同期や SMBDAT の競合の調停などの別の機能も含まれる。SMBus プロトコルに関するさらなる詳細は、非特許文献 2 に見られるだろう。SMBus プロトコルが参照されているが、一方、データバスは別の型式の通信プロトコル（例えば、コントローラ・エリア・ネットワーク（Controller Area Network（CAN））プロトコル）に基づいて実装できることは理解されよう。

10

【0060】

電池セルアレイ 106 の構成を、図 10 に関連してさらに説明する。電池セルアレイ 106 は、互いに隣接し、2つの接点 112 を介して負荷 98 に結合されている、複数の電池回路 108 を備える。各電池回路 108 は、1つの入力端子と1つの出力端子を有する1つの電池セル 110 を含む。電池セルアレイ 106 は、共に使用されるスイッチの個数と共に単調増加するコストと再構成可能性との間のトレードオフを行うことにより、設計されている。再構成可能性とは、任意の電池セルをバイパスし、セルの選択的放電または充電を介して効果的な電圧平衡を可能として、ランダムなセルの故障の際にもパックの動作時間を延長できるようにする能力を意味している。必要とされるスイッチの個数は接続要求に基づいて決定される。

20

【0061】

図 10 は、電池セルアレイ 106 内のスイッチの好適な配置を図示している。特に、第 1 のスイッチ 114（以下、P スイッチともいう）は負荷と電池セルの入力端子との間に接続され、第 2 のスイッチ 116（以下、S スイッチともいう）は電池セルの入力端子と、すぐ隣に隣接している電池回路内の電池セルの出力端子との間に接続され、第 3 のスイッチ 118（以下、B スイッチともいう）は電池セルの出力端子と、当該隣接している電池回路内の電池セルの出力端子との間に接続されている。ローカルコントローラは電池セルアレイ内の全てのスイッチに動作可能なように結合されており、それらの動作を選択的に制御する。

30

【0062】

このスイッチ配置は再構成可能な 2つの型式をサポートする。第 1 に、アレイ内の全てのセルを直列または並列に接続することができる。これらが並列（直列）に接続されると、アレイの容量（端子電圧）は1つのセルの容量（電圧）にセルの個数を乗じたものとなる。第 2 に、任意の個々のセルは別々に充電でき、これはセルの平衡化にとって重要である。

【0063】

セルを直列にするには、第 1 および第 3 のスイッチは開路位置に設定される一方で、第 2 のスイッチは閉路位置に設定される。直列配置の場合、一部の脆弱な（短絡した）セルは、全体の端子電圧がせいぜい脆弱なセルの電圧だけ低下することを除けば、アレイの電流にはほとんど影響しない。しかしながら一部の脆弱な（断線した）セルは電流の流れを阻止し、電池セルの直列鎖を使用不能とする。この脆弱なセルをバイパスするために、第 1 スイッチは開路位置に設定される一方で、第 2 および第 3 スイッチは閉路位置に設定され、これによりその脆弱な電池セルをバイパスする。

40

【0064】

セルは互いに並列に接続することができる。セルを並列に置くためには、第 1 および第 3 のスイッチが閉路位置に設定される一方で、第 2 のスイッチを開路位置に設定する。並

50

列配置においては、1つの短絡したセルは他のセルを使用不能とする。この場合、第3のスイッチを閉路位置に設定する一方で、第1および第2のスイッチを開路位置に設定し、その電池セルをバイパスする。結果として、セル毎に3個のスイッチがあれば、並列および直列配置のいずれの場合も、任意のセルをバイパスするのに十分である。アレイレベルのスイッチは、セルレベルのスイッチと同様の方法で配置されており、構成することができることに留意されたい。

【0065】

スイッチの故障については、故障したスイッチは、そのスイッチへの入力に係わらず、オンまたはオフいずれかの状態に永久に留まるとする縮退故障モデルを適用する。ローカルおよびグローバルコントローラはこれらのスイッチの故障を適時検出することができる。この故障モデルに基づき、電池パック全体の信頼性を以下のように分析する。

【0066】

信頼性が高く、頑強なスイッチは、高電圧および大電流に耐えるためには不可欠である。オン、オフ、および遷移の3つのスイッチモードが存在する。オンモードでは、スイッチは導通状態であり、例えばミリオームの桁の、低インピーダンスでなければならない（閉路位置ともいう）。インピーダンスが低いほど、電力損が低く、したがって放射熱が小さくなる。オフモードでは、スイッチは抵抗性であり、高電流を遮断する（開路位置ともいう）。高電圧では、特に機械式接点では、有害な電気アークが発生することがある。遷移モードでは、スイッチはオンからオフモードに、またその逆に、遷移する。電気アークを発生させる可能性がある高電圧によって、スイッチ回路が破壊されることもある。上記のスイッチ特性を考慮して適切なスイッチを選定しなければならない。半導体スイッチ、および電気機械式リレースイッチの2つの型式のスイッチがこのような要求に合致する。オンモードでは、スイッチのインピーダンスが必要な選択基準である。MOSFETやIGBTは比較的インピーダンスが低く、よって、これらは大電流アプリケーションに適している。例えば、MOSFETにおいて、インピーダンスを5ミリ・オームとすると、100アンペアの大電流で50ワットの電力損を生成する（ $P = I^2 \times R$ ）。一方、電気機械式リレーは半導体スイッチよりも2桁低い接点抵抗を有することが知られており、電力損を0.5ワットまで削減する。オフまたは遷移モードでは、電気機械式リレーは弱体化したりまたは高電圧が原因のアークにより破壊されることさえあり、一方、そのような影響は半導体スイッチには存在しない。そのようなアークを抑制するために、磁場に依存する追加のハードウェア構成部品を使用する場合もある。その他の型式のスイッチも本開示では考慮されている。したがって、スイッチに課せられる電流負荷を分析することが重要である。

【0067】

時間と共に変化する電流が広範囲にわたるときは、きめの細かい計測が必要とされ、広範な範囲はより高い計測能力に繋がる。サンプリング率が高いほど、測定の精度は高くなるが、コストが高くなり、高いサンプル率での高出力値は、高性能のプロセッサ／グローバルコントローラを必要とする。一般に、インフィニオン（Infineon：商標登録）社から購入できるTLE4998リニアホールセンサのような、デジタル信号処理と統合されたリニアホールセンサが、高精度測定では広く使用されている。

【0068】

電流検出は主にグローバルBMSで実施され、電池SOCの推計に使用される。アレイレベルの並列配置では、グローバルコントローラは電池パック全体からの電流を測定し（図9）、全てのアレイがそれらの電圧および抵抗値に関してほぼ同一であると仮定して、測定された電流をアレイの数で除して、各ローカルBMSの電流を推定する。これらの値の食い違いが特定の閾値を超えるときは、この推定はもはや妥当ではない。このような場合、個々のローカルBMSがそれらを測定できるべきであり、ローカルコントローラはその電池セルからの電流を、グローバルコントローラがアレイレベルで実施するのと同じように、測定する。明らかに、精度の上昇と、コストおよび作業量の削減とのトレードオフが存在する。測定頻度は、精度を計算オーバーヘッドと比較検討するための別の設計パラ

10

20

30

40

50

メータである。

【0069】

各々のローカルBMSは温度検出を実施することもある。主な熱源は電池セル、スイッチ、およびコントローラである。特に、電池セルがほとんどの熱を発生する。また、電池容量は外気温度によって変化する。電池（例えば、リチウムイオン）セルは、その温度が -50°C に近づくと正しく動作しなくなり、一方その温度が 75°C に近づくと爆発する場合がある。電池の動作温度はとても広い範囲に渡るので、高価ではない、 $\pm 19^{\circ}\text{C}$ (35°F) 程度の精度の温度計を使用する必要がある。サーミスタ、熱電対、測温抵抗体のようなデジタル温度計が、このような要求に合致する。また、放散熱を移すヒートシンクも必要である。熱伝達には、固体中、流体中、および真空を通しての3つの基本的なモードがあるが、ヒートシンクの選定は設計に特有のものである。

10

【0070】

グローバルおよびローカルBMSは「君主制に基づく」(monarchy-based) 関係を有する。グローバルコントローラはアレイレベルでの配置を、以下に示す体系的なスイッチ構成アルゴリズムを介して決定する。ローカルコントローラは、グローバルコントローラにより指示された配置にしたがって、表1に記載の命令コードを実行する。

【表1】

表1:命令型式およびコード

型式	ヌル NULL	初期化 INIT	バイパス BYPASS	並列 PARALLEL	直列 SERIES
コード	000	100	001	101	010

20

ローカルコントローラはまた、それらのセルレベルの配置を自発的に決定することも、またどのセルをバイパスするかを決定することもできる。君主制に基づく構造では、各ローカルコントローラはそのセルを監視し、グローバルコントローラからの問い合わせに対して応答する責任がある。君主制に基づく構成は、電池セルおよびアレイの配置、監視、およびスケジューリングに関する種々のタスクをローカルコントローラと分担することにより、大規模電池パックに拡張可能である。

30

【0071】

あるいは、グローバルおよびローカルコントローラの間の関係を、グローバルコントローラがセルおよびアレイのレベルの構成の両方を決定するような、完全集中型と見ることができる。完全集中型構造では、ローカルコントローラの役割は最小であり、したがって不必要であるが、グローバルコントローラは個々の電池セルを直接監視し、いくつかのセルをバイパスし、放電に関しては負荷の平衡化、充電に関してはセルの平衡化、または両方に関して電圧の平衡化を行うこともあろう。この意味において、完全集中型構造はいずれかのセルで引き起こされる異常を検出し防止する上で俊敏である。しかしながら、この構造は、管理すべき多数の電池セルにより、瞬時に圧倒されてしまう。セルの数が増えるほど、それらを監視する時間が長くなる。したがって、電池セルの個数がある数を超えると、君主制に基づく構造が完全集中型構造より良くなるであろう。

40

【0072】

例として示す実施例において、命令コードは3桁長である。最初の桁は第1のスイッチの状態を示し、そして第2および最終桁は、それぞれ第2および第3のスイッチの状態を示す。0(1)の値は、対応するスイッチがオフ(オン)であることを意味する。

これらのコードは、アレイレベルおよびセルレベルの両方でスイッチを制御するように設計されている。

【0073】

アレイレベルの構成において、グローバルコントローラは表1の中の適切な命令を個別のローカルコントローラに対して発する。一連の命令が、以下に示す体系的なスイッチ構

50

成アルゴリズムに基づいて、体系的に発せられる。そして、ローカルコントローラは送り出された命令を実行して、アレイレベルのスイッチを制御する。一方、セルレベルの構成においては、ローカルコントローラは一連の命令を個別のセルに対して独立に実行する。

【0074】

各々の命令はそれ自身の目的を有する。第1に、NULLコードはある特定の電池セル（アレイ）をオープンに保持するために適用され、そのセルの背後の全ての電池セル（アレイ）を切断する。例えば、セル2をNULLコードに設定すると、セル0および1はそれらのスイッチの構成に係わらず、使用されていないことを意味する。このバイパスは、セル0および1のまわりのあらゆるスイッチが機能不全の場合の選択肢となり得る。第2に、INITコードは電池セルアレイ（アレイの鎖）の開始を示す。したがって、このINITコードは、NULLコードが適用されているものの次の電池セル（アレイ）に適用される。第3に、BYPASSコードは、最初の、すなわちセル0（ローカルBMS0）を除く、あらゆるセル（アレイ）をバイパスするために適用される。最初のセル（ローカルBMS0）はそれ自身のスイッチを持たないので、INITコードがその次のセルに適用されて、最初がバイパスされる。次に、PARALLELコードは並列配置を作るために適用される。同様に、SERIESコードは直列配置を作るために適用される。

【0075】

グローバルBMSは、個別のローカルBMSがそれらの電池セルのアレイ内のセルを監視した電池状態（電圧、温度、および電流を含む）の情報を、定期的に、収集する。ローカルコントローラは電池セルのアレイの2つの端子間の端子電圧を測定する。一方で、個別セル、例えばセル*i*の電圧を測定するためには、ローカルコントローラはINITコードをセル*i*に適用し、BYPASSコードをセル*i*+1から*n*に適用する。セル0の場合は、BYPASSコードを全てのセルに適用する。次にグローバルコントローラは、収集期間中にローカルコントローラから電圧測定値を取ってくる。ローカルコントローラはまた、その電池セルのアレイの温度も測定する。温度がある閾値を超えると、ローカルコントローラは、NULLコードをセル*n*に発することにより、そのセルを負荷から切断する。電圧測定とは違って、ローカルコントローラはこの異常を、それが発生するときはいつでも、グローバルコントローラに報告する。電流測定に関しては、グローバルBMSに任せているが、それは高価なためである。

【0076】

ローカルBMSはセルレベルの配置に対して責任を持つ一方で、グローバルBMSはアレイレベルの配置に対して責任を持つ。以下に示すスイッチ構成アルゴリズムによれば、並列配置は直列配置に変更され、あるいは、その逆である。まず、グローバル（ローカル）コントローラは、*i*番目ビットの1および0がそれぞれ第*i*番目アレイ（セル）の接続およびバイパスを示す接続のビット配列**bar**を入力として取る。そして、最初に利用可能なアレイ（セル）を探索し、INIT命令をアレイレベル（セルレベル）のスイッチに適用する。その後、アレイ（セル）が並列または直列に接続されるとき、PARALLELまたはSERIESのコードが、それぞれ個別のアレイ（セル）に適用される。この様にして、アレイ（セル）が指定通りに接続される。

Set switches:

Input: *barr*(*n*+1): bit-array of battery connectivity;

Input: *ctype*: {parallel, series};

Output: *tarr*(*n*): type-array of switch configuration;

i ← 1;

while *barr*(*i*)<1 /*最初の利用可能ユニットを探索する*/

10

i ← *i*+1;

switch *barr* (*i*)

case 0: /*ユニットを負荷から切断する*/

tarr (*i*-1) ← null

case 1: /* ユニットの負荷に接続する*/

tarr (*i*-1) ← init;

break;

20

i ← *i*+1;

while *i* ≤ *n*+1 /*残りのユニットを接続する*/

switch *barr* (*i*)

case 0: /*ユニットをバイパスする*/

tarr (*i*-1) ← bypass;

case 1: /* ユニットの直列または並列に接続する*/

tarr (*i*-1) ← *ctype*;

30

i ← *i*+1;

【 0 0 7 7 】

電池の活動（すなわち、充電、放電、および休止）の進行中に、いずれかのアレイ（セル）がバイパスされる場合がある。この場合、グローバル（ローカル）コントローラはどのアレイ（セル）がバイパスされるべきか *barr* を設定して決定し、次に *barr* でアルゴリズムを実行する。バイパスされるアレイを有するローカル BMS は、電力を節約するために監視が中止された休眠モードに入ることもあろう。休眠モード中のローカル BMS はグローバルコントローラの要求で動作モードに復帰する。休止期間は放電率に依存し、放電率が低いほど、休止期間は長くなる。

40

【 0 0 7 8 】

スイッチ構成アルゴリズムを実行するローカルコントローラは、スケジューリング機構に基づき、電圧の平衡化を効果的に実行することができる。また、ローカルコントローラは、NUL命令をアレイレベルのスイッチに適用することで、その電池セルのアレイを開回路にするよう、自動的に決定できる。これはアレイが過熱する、過充電になる、または過放電されるという、例外の場合である。

【 0 0 7 9 】

アプリケーションは、電池の残り動作時間、電池が完全に充電されるまでの時間、および電池の寿命をグローバル BMS に要求し、とりわけ、寿命の正確な予測はその電池の寿命保証に非常に重要である。第 1 に、電池の動作時間に関して、グローバル BMS は集計

50

された電圧および電流を参照モデルに入力する。この参照モデルは、時間に依存する充放電率の関数を含む。参照モデルの 1 例は、非特許文献 3 に記述されており、それはここに参照することで組み入れられている。参照モデルを適用することで、残り動作時間が得られる。第 2 に、電池の動作時間の計算と同じように、電池が完全に充電されるまでの時間もまた、現在の充電率を用いて、参照モデルから得られる。第 3 に、高インピーダンスは大電力を消費して熱を発生するため、電池の寿命は電池セルの内部インピーダンスに基づき算定される。これは最終的に供給電圧を低下させ、その影響は他の電池セルにも伝搬するであろう。そのような不可逆的劣化は電池寿命を短くするであろう。寿命を算定するために、電池の端子電圧を測定し、 V_0 を基準電圧、 R と r を負荷および内部インピーダンスとして、電池の内部インピーダンスを

10

$$V = \frac{R}{R+r} V_0$$

の様に計算する。この目的のためには種々の方法が利用できることに注意されたい。

【0080】

先に説明したように、スイッチ内部の抵抗が一定とすると、スイッチの電力損は、それを流れる電流が増えるにつれて、指数関数的に増加する。したがって、算定には、スイッチに課せられる電流が不可欠である。アレイレベルのスイッチ上の電流負荷は、並列および直列の配置に区別される。簡単のために、全てのアレイは同一であると仮定する。使用されるパラメータは次のように定義される。

20

- ・ χC : 負荷により要求されるクーロン (毎秒)
- ・ p : ローカル BMS がバイパスされる確率
- ・ $r \leq N$: 全部で N 個のアレイのうち、充電または放電のために負荷に接続されるローカル BMS の数
- ・ $k \leq r$: r 個の BMS のうち、連続して接続されるローカル BMS の数
- ・ i : $(k+1)$ 番目のローカル BMS に先行する k 個のうちの、ローカル BMS の数

【0081】

並列配置では、各ローカル BMS 内のアレイレベルの P スイッチ (図 1) は、電池の充電または放電中に、オンに切り替えられる。電流負荷は r 個のローカル BMS で均等に分担されているので、P スイッチには、確率 $(1-p)$ で

30

$$\frac{\chi}{r} C$$

の負荷が掛かっている。アレイレベルの S スイッチは決してオンに切り替えられない。一方、アレイレベルの B スイッチは導体の役を果たしている。したがって、カスタマイズされた電池セルのアレイでは、S スイッチおよび B スイッチは除去され、配線で置き換えることが可能である。さもなければ、B スイッチ上の電流負荷は、 i が増加するのと比例して増加し、確率 $(1-p)$ で

40

$$\frac{i\chi}{r} C$$

となる。

【0082】

直列配置では、各ローカル BMS 内のアレイレベルの S スイッチは、そのローカル BMS がバイパスされない限り、常にオンとされている。これらの S スイッチ上の各々の電流は等しく、 $(1-p)$ の確率で χC となる。一方、ローカル BMS 内のアレイレベルの P スイッチは、先行する全てのローカル BMS がバイパスされている場合のみ、オン

50

に切り替えられる。したがって、 $(k+1)$ 番目のローカル BMS 内の P-スイッチ上の電流は $p^k(1-p)\chi C$ に等しい。1つのローカル BMS 内のアレイレベルの B-スイッチは、そのローカル BMS が p の確率でバイパスされるときのみオンに切り替えられ、結果として $p\chi C$ となる。表 2 は、 $(k+1)$ 番目のローカル BMS 内のアレイレベルのスイッチのそれぞれの上での電流負荷を示す。

【表 2】

表2: $(k+1)$ 番目のローカル BMS 内のアレイレベルのスイッチ上の電流

配置	P-スイッチ	S-スイッチ	B-スイッチ
並列	$(1-p)\frac{x}{r}C$	0C	$(1-p)\frac{ix}{r}C$
直列	$p^k(1-p)\chi C$	$(1-p)\chi C$	$p\chi C$

10

【0083】

アレイレベルのスイッチ同様、セルレベルのスイッチは同一パターンで負荷がかけられる。しかしながら、セルレベルでは 1つの電池セルアレイに供給される電流は、アレイレベルの配置により変化する。アレイレベルの並列配置では、アレイレベルの P-スイッチ上の電流負荷は直接、アレイに流れ込み、すなわち

$$C^* = 1(1-p)\frac{x}{r}C$$

20

であって、一方、アレイレベルの直列配置では、アレイレベルの S-スイッチ上のそれが同じようになって、すなわち

$$C^* = 1(1-p)\frac{x}{r}C$$

となる。 C^* と C_+ が与えられると、各セルレベルのスイッチ上の電流負荷が決定される。使用されるパラメータは次のように定義される。

30

・ q : 全部で n 個のセルのうち、電池セルのアレイ内の充電または放電のためのセルの確率

・ $s \leq n$: 全部で n 個のセルのうち、充電または放電のために、電池セルのアレイ内に接続されるセルの数

・ $1 \leq s$: 1つの電池セルのアレイ内で連続して接続されるセルの数

・ j : $(1+1)$ 番目のセルに先行する 1 個のセルのうちの、セルの数

【0084】

並列配置において、1つの電池セルアレイ内のセルレベルの P-スイッチのそれぞれは、電池の充電または放電中に、オンに切り替えられる。電流負荷は s 個の電池セルで等しく分担されており、アレイレベルの並列（直列）配置の中では、 $(1-q)$ の確率で

40

$$\frac{1}{s}C^*(C^+)$$

となる。その一方で、セルレベルの S-スイッチは決してオンに入れられることは無く、セルレベルの B-スイッチは導体の役を果たす。対応するアレイレベルのスイッチと同様、これらは除去したりまたは配線で置き換えることができる。さもないければ、セルレベルの B-スイッチ上の電流負荷は j が増すにしたがって比例的に増加し、アレイレベルの並

50

列（直列）配置では、（ $1 - q$ ）の確率で

$$\frac{j}{s} C^* (C^+)$$

となる。

【0085】

直列配置では、各セル内のセルレベルのSスイッチは、対応するセルがバイパスされない限り、常にオンにされている。これらのSスイッチの各々の電流は同一であり、（ $1 - q$ ）の確率で C^* / C^+ となる。アレイレベルのPスイッチとBスイッチの上の電流負荷は、アレイレベルの直列配置のときと同様の方法で得られる。表3は（ $1 + 1$ ）番目のセル内の各セルレベルのスイッチ上の電流負荷を示す。

【表3】

表3: (1+1)番目のローカルBMS内のセルレベルのスイッチ上の電流。

C^* および C^+ はアレイレベルの配置、すなわちアレイレベルのPスイッチにより決定される入力電流。

配置	P-スイッチ	S-スイッチ	B-スイッチ
並列(並列)	$\frac{(i-q)}{s} C^*$	0C	$(1-q) \frac{j}{s} C^*$
並列(直列)	$\frac{(1-q)}{s} C^+$	0C	$(1-q) \frac{j}{s} C^+$
直列(並列)	$q^i (1-q) C^*$	$(1-q) C^*$	$q C^*$
直列(直列)	$q^i (1-q) C^+$	$(1-q) C^+$	$q C^+$

電池パックの経済性を算定するために、総コスト C_T を製造およびサービスのコストの合計として

【数14】

$$C_T = C_M + C_S \quad (14)$$

と定義し、ここで C_M および C_S はそれぞれ、製造およびサービスのコストである。 C_S は保証期間中の電池パックの信頼性に依存する一方で、 C_M は不完全な検査工程に密接に関係する。信頼性を算定するために、単純な電池故障モデルを用い、電池セルは、それが開回路（ $F_B = 0$ と表す）または短絡（ $F_B = 1$ と表す）となって、故障するとする。同様に、縮退故障モデルでは、スイッチは、入力に関係なく、ON（ $F_{SW} = 1$ と表す）またはOFF（ $F_{SW} = 0$ と表す）の状態に固着して、故障する。コストモデルはさらに次のように記述される。

【0086】

製品を顧客に出荷する前に検査することは、それらの現場での故障が大きな出費を招き、また顧客満足また製造者の評判に影響するため、重要である。N個の電池セルのアレイが1つの電池パックを形成し、観測されるパック当たりの収率（yield）を y_a とすると仮定すると、パック当たりの製造コストは、

【数 1 5】

$$C_M = \frac{N \cdot C_A}{y_a} \quad (15)$$

とモデル化できる。収率は 1 つの電池パックが検査を合格する確率である。この確率は故障検出率 F に依存し、 $F = 0$ のとき故障は発生しない。負の二項歩留まりモデル (negative binomial yield model) を用いると、この確率は

【数 1 6】

$$y_a(F, \lambda_a, a) = (1 + \frac{F \cdot \lambda_a}{a})^{-a}, \quad (16)$$

10

と表され、ここで λ_a はアレイ毎の平均欠陥数であり、 a は欠陥が集合する程度を表す。 $\lambda_a = 0$ のとき、電池セルのアレイは無故障である。 $a \rightarrow 0$ のとき、欠陥は強く集合し、一方、 $a \rightarrow \infty$ は弱い集合に対応する。

【0 0 8 7】

電池パックは、保証期間終了前に故障する場合もある。たとえそのパック内の幾つかの電池セルのアレイが故障したとしても、上述の再構成可能電池システム 9 0 であっても、また再構成可能なスイッチを具備していない従来型 B M S であっても、パックは、予備アレイによって「動作」することができる。1 つの電池パックは、それぞれが n 個の電池セルで構成されている N 個の電池セルのアレイから成る。 n 個のアレイのうちの少なくとも M 個が機能する限り電池パックは動作可能であり、各アレイは n 個の電池セルのうちの少なくとも m 個が機能する限り動作可能であると仮定する。この仮定を再構成可能電池システム 9 0 および従来型 B M S に適用する。電池パックの故障は、その修理または交換のためのサービスコストを生じ、これは通常、その価値以上に高価である。すると、このサービスコストは、パックの信頼性に直接関係し、

20

【数 1 7】

$$C_S = (1 - R_p(t) y_a) C_F \quad (17)$$

30

とモデル化できるが、ここで C_F はパック毎のサービスコスト、また $R_p(t)$ は、時刻 t においてそのパック内の少なくとも M 個の電池アレイが依然として動作可能である信頼性 (確率) である。 $R_p(t)$ は個々のアレイの信頼性に依存する。 $R_A(t)$ を、電池セルのアレイが、個々の構成部品、すなわち電池セルおよびスイッチについて、時刻 t で動作している確率とする。また、 X_B (X_{SW}) を、母数 λ_B (λ_{SW}^*) の、電池セル (スイッチ) についての、指数分布確率変数とする。すなわち、

$$P\{X_B > t\} = e^{-\lambda_B t} \text{ および } e^{-\lambda_{SW}^* t}$$

40

である。分析を簡単にするために、全ての電池セル (スイッチ) は同一と仮定する。

【0 0 8 8】

$R_p(t)$ は基礎としている故障モデルおよび電池配置により変わるので、 $(F_B, F_{SW}) = \{(x, y) \mid x, y \in \{0, 1\}\}$ のような故障モードのそれぞれ、ならびに、アレイレベルでの並列および直列配置に関して計算され、8 通りの組合せとなる。それぞれの組合せは 2 つの部分、すなわちセルレベルでの並列および直列配置に分けられる。これらの構成を示すために、 N は構成を表し、 x および y はそれぞれアレイレベルおよびセルレベルでの配置を表すとして、表記 $C_N \cdot x y$ を用いる。以下の表 4 は、全ての構成

50

を故障事象と共に列挙している。

【0089】

再構成可能電池システム90を具備した電池パックの信頼性を従来型BMSと比較する。並列配置において、1つの短絡電池セル（すなわち、 $F_B = 1$ ）はドミノ効果を起こし、全電池パックの故障を引き起こして機能不全とする。この効果は従来型BMSにとって致命的である。したがって、従来型BMSのシステムの信頼性は個々の電池セルのそれに左右され、表4においてアレイレベルではC1.p、セルレベルではC1.ppとなる。対照的に、再構成可能電池システム90は、スイッチの設定を介して全体の故障を効果的に抑止し、この中でPスイッチが決定的な役割を果たす。スイッチがオン状態で固着した場合（すなわち、 $F_{sw} = 1$ ）、たとえ1つの電池セル（アレイ）が故障したとしても、Pスイッチが機能し、少なくともn個のセルのうちのm個（N個のアレイのうちのM個）が機能する限り、アレイ（パック）全体は動作し、電池セル（アレイ）と対応するPスイッチの両方が機能しなくなったときのみ、アレイ（パック）は機能しなくなって、セルレベルではC1.ppの信頼性（アレイレベルではC2.p）となる。スイッチがオフ状態で固着した場合（すなわち、 $F_{sw} = 0$ ）、これらのスイッチは電池セル（アレイ）の信頼性を低下させ得る。したがって、電池セル（アレイ）寿命および対応するPスイッチの寿命の最小値がアレイ（パック）の信頼性を決定し、セルレベルではC3.p（アレイレベルではC3.pp）となる。一方で、1つの開放回路電池セル（すなわち、 $F_B = 0$ ）は、出力電圧がそのセルの分も低下することを除き、アレイ全体の動作にはほとんど影響を与えない。したがって、アレイ（パック）は、少なくともn個のセルのうちのm個（N個のアレイのうちのM個）が動作する限り動作し、その結果セルレベルではC5.pの信頼性（アレイレベルではC5.pp）となる。

【0090】

一方で、直列配置では、短絡電池セルは、並列配置の際の開放回路セルと同じ効果をアレイの信頼性に与える（C2.sとC2.ssを参照）。開放回路セルは、従来型BMSでは全アレイ（パック）の機能不全を引き起こすため、致命的である。この効果は並列配置での短絡回路セルと同じである。再構成可能電池システム90は、対応するBスイッチをオンとし、Sスイッチをオフにすることで、開放回路セルをバイパスする。スイッチがオン状態で固着する場合、Bスイッチが信頼性に対して決定的である。そのような場合、セル（アレイ）は開放回路となり、全アレイ（パック）の電圧はわずかに低下する。この信頼性はC1.ps（また、表4のC2.ss、C3.ps、C4.ss、C1.pps、C6.ss、C1.pps、およびC8.ss）、およびセルレベルのC2.s（アレイレベルのC4.s、C6.s、およびC8.s）と同じである。これらがオフ状態で固着するとき、Sスイッチが決定的であり、Bスイッチの場合と同じ信頼性の結果となる。全ての構成の信頼性が表4に示されている。

【表 4 - 1】

表4:DESAと従来型BMSの信頼性比較

$Conf.(F_B, F_{SW})$	DESAの信頼性
C1.p(1,1)	$R_p(t) = 1 - \left\{ \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} (P\{X_{SW} \leq t\} (1 - R_A(t)))^i (1 - P\{X_{SW} \leq t\} (1 - R_A(t)))^{n-i} \right.$ $\left. + \sum_{i=m+1}^n \binom{n}{i} (P\{X_{SW} > t\} (1 - R_A(t)))^i (1 - P\{X_{SW} > t\} (1 - R_A(t)))^{n-i} \right\}$
C1.pp(1,1)	$R_A(t) = 1 - \left\{ \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} (P\{X_{SW} \leq t\} P\{X_B \leq t\})^i (1 - P\{X_{SW} \leq t\} P\{X_B \leq t\})^{n-i} \right.$ $\left. + \sum_{i=m+1}^n \binom{n}{i} (P\{X_{SW} > t\} P\{X_B \leq t\})^i (1 - P\{X_{SW} > t\} P\{X_B \leq t\})^{n-i} \right\}$
C1.ps(1,1)	$R_A(t) = \sum_{i=m}^n \binom{n}{i} P\{\min(X_B, X_{S_C}) > t\}^i (1 - P\{\min(X_B, X_{S_C}) > t\})^{n-i}$
C2.s(1,1)	$R_p(t) = \sum_{i=M}^N \binom{N}{i} (R_A(t) P\{X_{S_A} > t\})^i (1 - R_A(t) P\{X_{S_A} > t\})^{N-i}$
C2.sp(1,1)	C1.pp
C2.ss(1,1)	C1.ps
C3.p(1,0)	C2.s
C3.pp(1,0)	C1.ps
C3.ps(1,0)	C1.ps
C4.s(1,0)	C2.s
C4.sp(1,0)	C1.ps
C4.ss(1,0)	C1.ps
C5.p(0,1)	従来型BMSと同じ
C5.pp(0,1)	従来型BMSと同じ
C5.ps(0,1)	C1.ps
C6.s(0,1)	C2.s
C6.sp(0,1)	C5.pp
C6.ss.(0,1)	C1.ps
C7.p(0,0)	C2.s
C7.pp(0,0)	C1.ps
C7.ps(0,0)	C1.ps
C8.s(0,0)	C2.s
C8.sp (0,0)	C1.ps
C8.ss	C1.ps

10

20

30

40

【表 4 - 2】

$Conf.(F_B, F_{SW})$	λ_{SW}^*	従来型BMSの信頼性
C1.p(1,1)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-p)}{M} x$	$R_p(t) = \prod_{i=1}^N R_A(t)$
C1.pp(1,1)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-q)(1-p)}{mM} x$	$R_A(t) = \prod_{i=1}^n P\{X_B > t\}$
C1.ps(1,1)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} q \frac{(1-p)}{M} x$	$R_A(t) = \sum_{i=n}^n \binom{n}{i} P\{X_B > t\}^i (1 - P\{X_B > t\})^{n-i}$
C2.s(1,1)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} px$	$R_p(t) = \sum_{i=M}^N \binom{N}{i} R_A(t)^i (1 - R_A(t))^{N-i}$
C2.sp(1,1)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-q)(1-p)}{m} x$	C1.ps
C2.ss(1,1)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} q(1-p)x$	C1.ps
C3.p(1,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-p)}{M} x$	C1.p
C3.pp(1,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-q)(1-p)}{mM} x$	C1.pp
C3.ps(1,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-q)(1-p)}{M} x$	C1.ps
C4.s(1,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} (1-p)x$	C2.s
C4.sp(1,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-q)(1-p)}{m} x$	C1.pp
C4.ss(1,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} (1-q)(1-p)x$	C1.ps
C5.p(0,1)	--	C2.s
C5.pp(0,1)	--	C1.ps
C5.ps(0,1)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} q(1-p)x$	C1.pp
C6.s(0,1)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} px$	C1.p
C6.sp(0,1)	--	C1.ps

10

20

30

40

【表 4 - 3】

C6.ss.(0,1)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} q(1-p)x$	C1.pp
C7.p(0,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-p)}{M} x$	C2.s
C7.pp(0,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-q)(1-p)}{mM} x$	C1.ps
C7.ps(0,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-q)(1-p)}{M} x$	C1.pp
C8.s(0,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} (1-p)x$	C1.p
C8.sp (0,0)	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} \frac{(1-q)(1-p)}{m} x$	C1.ps
C8.ss	$\lambda_{sw} \frac{1}{\tau} (1-q)(1-p)x$	C1.pp

10

20

【0091】

1つのスイッチの寿命はそれに課せられる電流負荷によって変わるので、各スイッチの平均寿命（ $\lambda *_{sw}$ ）は、表2および3に示された充電電流負荷の一部を使用し、正規化係数 τ および指数確率変数 λ_{sw} を定義して決定される。各構成の中で使用される主スイッチの平均寿命も、表4に示されている。

【0092】

再構成可能電池システム90の信頼性および拡張性を評価するために、スイッチでの電力損、全電池システムの信頼性、および故障時のサービスコストを含む指標が使用されている。上に挙げたパラメータが表5に列挙され特定されている。

30

【表 5】

表5:パラメータおよび値

パラメータ	記述	値
F	故障検出率	0.05
λ_a	欠陥の平均数	3
α	クラスタリング (Clustering)	2
C_A	(正規化された)アレイ当たり製造コスト	1
N	アレイの数	[20, 40]
M	利用可能アレイの最小数	[10, 20]
C_F	アレイ当たりのサービスコスト	[15, 20]
n	アレイ当たりの利用可能セルの数	[15, 20]
m	アレイ当たりの利用可能セルの最小数	[15, 20]
$1/\lambda_B$	電池セルの寿命(年)	23
$1/\lambda_S$	3アンペアスイッチの寿命(年)	$1.5/\lambda_B$
p	1つのアレイをバイパスする確率	0.05
q	1つのセルをバイパスする確率	0.05
r	負荷に接続されるアレイの数	[7,10]
s	負荷に接続されるセルの数	[15,20]
x	電流アンペア(クーロン)	[1,10]
τ	正規化因数	$2(C^+ + C^-)$

以下では、上記の指標とパラメータを用いて、再構成可能電池システム 90 の優位性を、再構成機能を持たない従来型 BMS に対する優位性との関係によって示す。

【0093】

スイッチをオン／オフするために5つの命令コードが定義されている。セルレベルの配置において、ローカル（グローバル）コントローラは最初にどの電池セル（アレイ）がオンとされるべきかを決定する。この決定の後、バーン・パラメータ（barn parameter）の組を用いて、ローカル（グローバル）コントローラはスイッチ構成アルゴリズムを適用し、オンおよびオフスイッチの組み合わせを形成する。図11は命令コードのシーケンスとスイッチの組み合わせの間の対応を示す。一般性を失うことなく、全ての電池セル（アレイ）の電圧を1ボルトと仮定する。例えば総電圧を1に設定するときは、ローカルコントローラはスイッチ16をオンにし、その結果セル6（すなわち7番目のセル）がアクティブになる。セル6の前（後ろ）のセルは開路（バイパスされた）状態となる。

【0094】

2ボルトのアレイでは、セル0とセル10が直列接続される。一般に、INITコードはアクティブな電池セルアレイの始まりを示す。すなわち、先行する電池セルは、それらの接続に係わらず、無視される。セルのバイパスは、先行する電池セルに関連するスイッチが機能不全の際に効果的に適用される。この機能は、さもなければ電池セルアレイ全体を故障させるであろう単一の電池セルまたはスイッチの故障の影響を最小とする。

【0095】

再構成可能電池システム90には3つの型式のスイッチが使用され、Pー、Sー、およびBースイッチである。各スイッチは、それらの不可避の内部抵抗のため電力損を被る。それらの電力損は並列または直列配置により異なる。直列配置では、Sースイッチがオンとなっている。図12に示すように、これはかなりの電力を消費する。対照的に、電池セルをバイパスするためにはBーおよびSースイッチがそれぞれオンおよびオフとされる。したがって、電池セルをバイパスする可能性がスイッチでの電力損を規定し、バイパスの可能性がより高いと、対応するSースイッチでの電力損が少なくなり、対応するBースイッチでの電力損が大きくなる。並列配置ではPースイッチがオンとされる。しかしながら、負荷への電流は複数の電池セルに分配されるので、そこでの電力損は直列配置でのSー

10

【0096】

電池パックはN個中のM個の電池セルアレイが機能する限り動作する。同様に、アレイはn個中のm個の電池セルが機能する限り動作する。言葉を変えれば、 $(n-m)M + (N-M)n$ 個の電池セルがバックアップとして使用できる。バックアップ・セルがより多く利用可能であるほど、電池パックは長持ちする。再構成可能電池システム90は、冗長な電池セルを利用することに関して従来型BMSよりも効果的である。図13Aに示すように、再構成可能電池システム90は、パックの信頼性を従来型BMSよりも平均で2.7倍改善する。さらに、再構成可能電池システム90は多くの電池セルを効果的に取り扱うことができる。図13Bに示すように、再構成可能電池システム90は、多くの電池セルを取り扱うことのできない従来型BMSと比較して、1つのアレイ内の利用可能電池セルの数(m)が10倍に増えたときに、信頼性を3.5倍改善する。

20

【0097】

個々の電池セルは概して、例えば23年間というように、長持ちするが、これらのセルで形成された電池パックの寿命はそれほど長く続くとは保証されない。実際、それはセルの配置とそれらの(ランダムな)故障に影響される。例えば、電池セルが並列に接続されている場合、1つの短絡セルは全電池パックを使用不能とする。直列配置の場合、開放回路セルは同じ結果をもたらす。再構成可能電池システム90はそのような単一セルの故障によって、パック全体が故障するのを効果的に防止する。図14Aに示すように、再構成可能電池システム90は、全電池寿命にわたって、平均で、従来型BMSの2倍の信頼性を提供する。特に、再構成可能電池システム90で10年間管理された電池パックは、その信頼性が26%に過ぎない従来型BMSで管理されたものよりも3倍信頼性が高い。先に述べた最悪ケースのシナリオでは、図14Bに示すように、再構成可能電池システム90は、たった一つの電池セルの故障から引き起こされるパック全体の故障を受けやすい従来型BMSよりも、1桁信頼性が高い。したがって、再構成可能電池システム90は、発生する可能性のある故障のタイプに関係なく、堅牢な電池管理を提供する。

30

【0098】

本実施例のこれまでの説明は、例証および説明を目的として提供されている。網羅すること、または発明を制限することを意図するものではない。特定の実施例の個別構成要素または機能は一般に、その特定の実施例に制限するものではなく、あてはまる所では、特に図示または記述されていなくとも、互換性があり、選択された実施例で使用可能である。同じとされているものもまた、多くの方法で変更されていてもよい。そのような変更は本発明から逸脱するものとは見なすべきではなく、全てのそのような修正変更は本発明の範囲に含まれることを意図している。

40

【0099】

例として示す実施例は、本開示が徹底したものとなり、当業者にその範囲を完全に伝えるために提示されている。本開示の実施例の徹底的な理解を提供するために、具体的な構

50

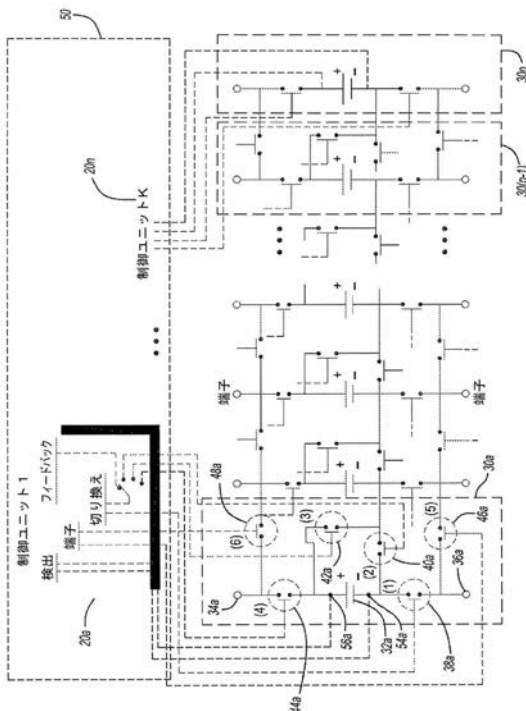
成部品、素子、および方法の例などの多くの具体的な詳細が説明されている。当業者には明らかなように、そのような具体的な詳細を採用する必要はなく、例として示す実施例は多くの異なる形式で実施され、いずれも本開示の範囲を制限するものと解釈されるべきではない。いくつかの例として示す実施例の中で、良く知られている処理工程、良く知られている素子構造、および良く知られている技術は、詳細には説明されていない。

【0100】

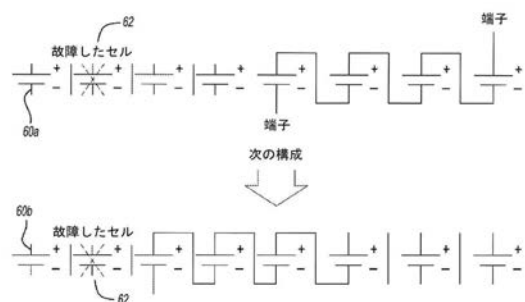
ここで使用された用語は特定の実施例を説明する目的だけであり、制限することは意図していない。ここで使用されている単数形式「a」、「an」、および「the」は、文中でそうでないと明示されていない限り、複数形式も同様に含むことを意図しているかもしれない。用語「を含む (comprises)」、「を含み (comprising)」、「を含み (including)」、および「有する (having)」は包括的であり、したがって、言及された機能、完成体、手順、操作、要素、および／または構成部品の存在を特定するが、1つまたは複数のその他の機能、完成体、手順、操作、要素、構成部品、および／またはそれらのグループの存在を排除するものではない。ここに説明されている方法、手順、処理工程、および操作は、特に実施の順序が指定されていない限り、説明されまたは図示された特定の順序の実施を必然的に要求するように解釈されるべきではない。また追加のまたはこれに代わる手順も採用できるとも理解されるべきである。

10

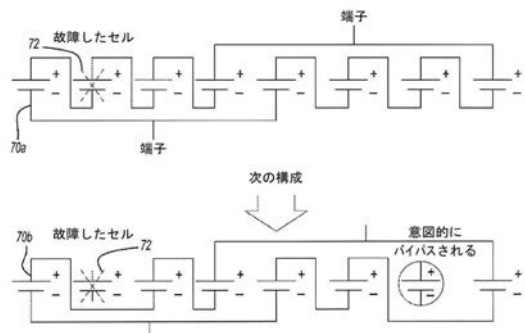
【図 1】



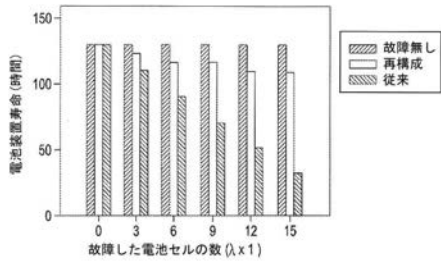
【図 2】



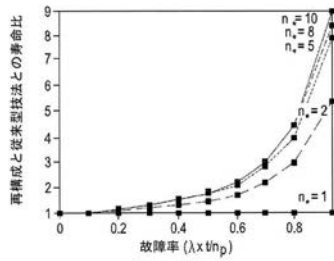
【図 3】



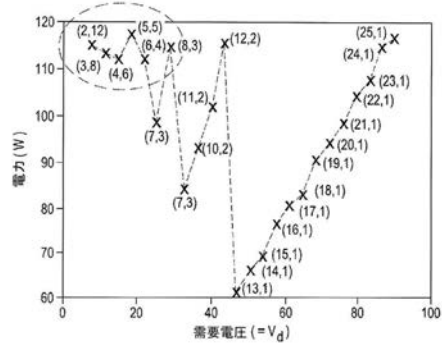
【図 4】



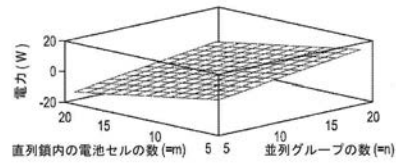
【図 5】



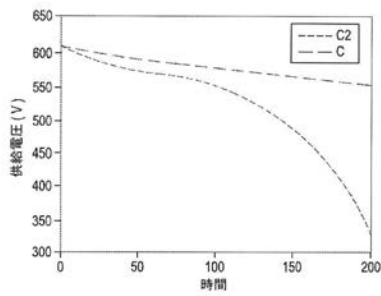
【図 6】



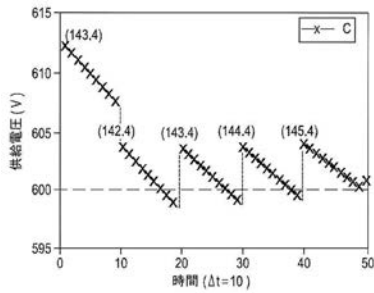
【図 7】



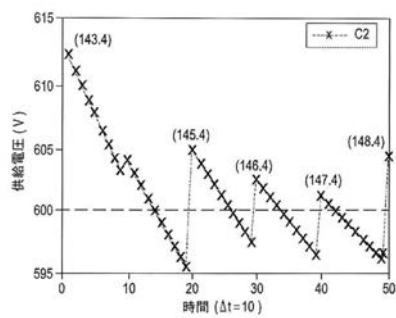
【図 8 A】



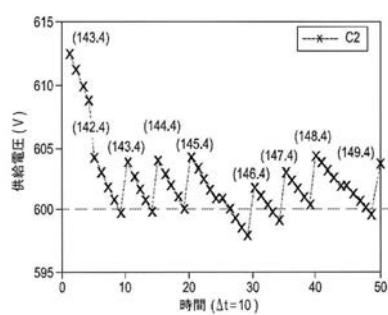
【図 8 B】



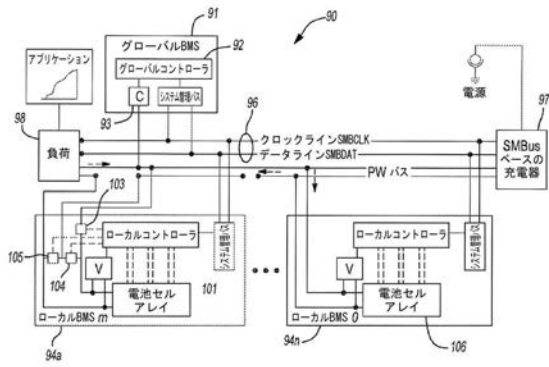
【図 8 C】



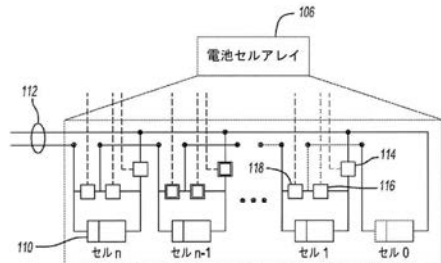
【図 8 D】



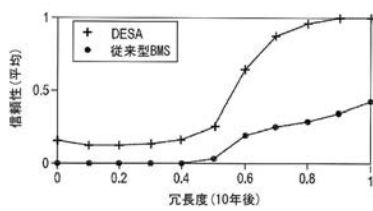
【図 9】



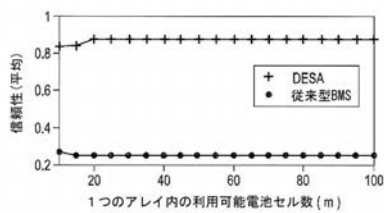
【図 10】



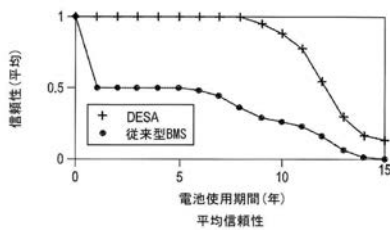
【図 13 A】



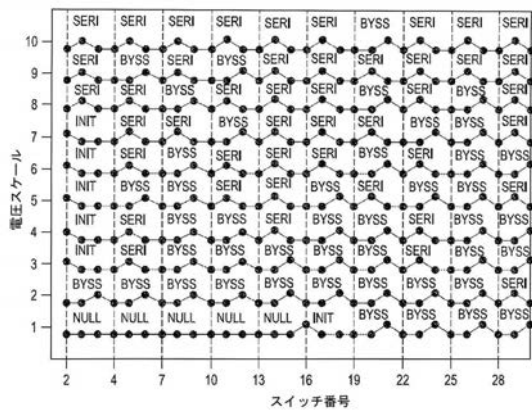
【図 13 B】



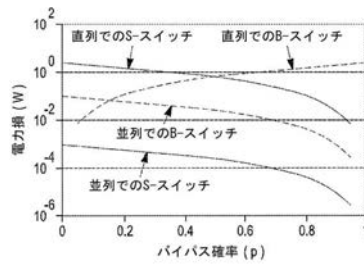
【図 14 A】



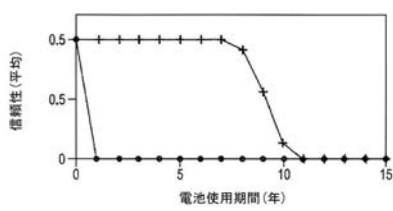
【図 11】



【図 12】



【図 14 B】



フロントページの続き

(72)発明者 シン、カン ジー.

アメリカ合衆国、ミシガン、アンナーバー、ダインズ コート 3 7 6 5

Fターム(参考) 5G503 AA01 BA03 BB01 BB02 CA01 CA08 CA11 CC02 EA02 EA05

EA06 EA08 FA06 FA19 GA01 GB03 GD02 GD03 GD04