

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：32657
研究種目：若手研究
研究期間：2019～2021
課題番号：19K14969
研究課題名（和文）高効率セルバランス機能と常時セル監視機能を統合した革新的電池管理システムの開発

研究課題名（英文）Study on an innovative battery management system integrating a high efficiency cell voltage balance function and a real time cell monitoring function

研究代表者
佐藤 大記（Satou, Daiki）

東京電機大学・工学部・助教

研究者番号：80772607
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、セルバランス機能とセル監視機能を1つの回路に統合することで、高効率なセルバランス機能と蓄電セルの常時監視機能を両立する、革新的電池管理システムを構築した。蓄電セルとスイッチング素子のESRを予め取得しておき、センサにより取得した均等化電流を用いることで蓄電セルの開放電圧を推定した。実機実験により制御手法の有用性を検証した結果、推定誤差を約1/10に低減可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、蓄電装置の長期安定運用に不可欠であり、これまで独立した回路として設備されることが多かったセルバランス回路とセル監視回路について、制御手法の工夫により1つの回路に統合可能であること、高効率なセルバランス機能と蓄電セルの常時監視機能を両立可能であることを示した点に学術的意義がある。本研究成果により、蓄電装置のさらなる普及の一助となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This project developed an innovative battery management system that combines high efficient cell balancing and real-time cell monitoring by integrating the cell balancing and cell monitoring functions into a single circuit. The ESRs of the storage cells and switching devices were obtained in advance, and the open-circuit voltage of the storage cell was estimated using the equalization current. The experimental results demonstrated that the estimation error could be reduced to 1/10 using the proposed control method.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：電池管理システム セルバランス回路 セル監視回路 蓄電池 電気二重層キャパシタ リチウムイオン電池 LC直列回路

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、省エネや電力の安定化を目的として、電気自動車やスマートハウス、電力グリッド等の幅広い分野において電力貯蔵装置の需要が拡大している。電力貯蔵装置に使用される蓄電素子は単セルあたりの電圧が低いことから、一般に複数の蓄電セルを直列に接続した蓄電モジュールとして利用されているが、このような蓄電セルの直列接続下では各セルの個体差や温度等の違いにより、各セル間で「電圧アンバランス」が生じる。

電圧がアンバランスな状態で蓄電モジュールを充電した場合、各セル中で電圧の最も高いセルが満充電となった段階で、蓄電モジュールとしては充電を停止しなければならない。他方、放電時には、各セル中で電圧の最も低いセルが空になった段階で、蓄電モジュールとしては放電を停止する必要がある。そのため、各セル間で電圧のアンバランスが生じると、蓄電モジュールに利用できない「余力」が生じ、充電容量を最大限に活用できないという問題が生じる(図1)。そのため、電力貯蔵装置の安定運用には、各セル間で生じる電圧アンバランスを補正するセルバランス回路が不可欠である。

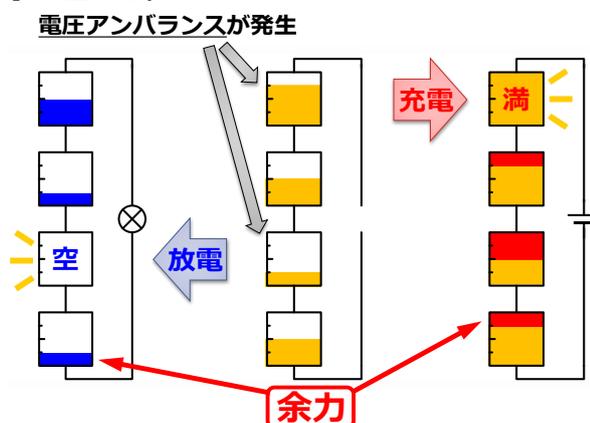


図1 電圧アンバランスによる「余力」の発生

これまでにも多数のセルバランス回路が提案されているが、現在最も一般的な手法は抵抗方式である。抵抗方式では、各セルと並列に接続された抵抗を用いて、各セルの電圧が蓄電モジュール中で最も電圧の低いセルと同じ電圧になるように、他のセルの蓄電エネルギーを抵抗により消費させ電圧をバランスさせる。そのため、抵抗方式ではセルバランス時の損失が大きい(図2)。

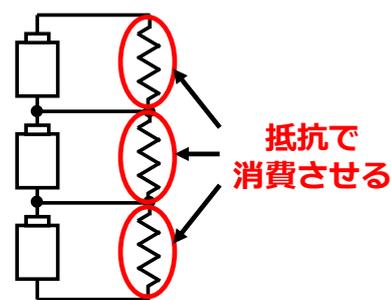


図2 抵抗方式セルバランス回路

加えて、電力貯蔵装置を安定的に運用するためには、前述のセルバランス回路の他に蓄電セルの状態を常時監視するセル監視回路が必要不可欠である。これまでに提案されているセル監視回路では、セル監視機能のみを有する専用回路であるものが多かった。

したがって、近年需要が拡大している電力貯蔵装置の安定運用のためには、抵抗に依らない高効率なセルバランス機能と蓄電セルの常時監視機能を両立した電池管理システムが求められる。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに例の無い、高効率なセルバランス機能と蓄電セルの常時監視機能を両立した、革新的電池管理システムの構築を目指す。

抵抗方式ではセルバランス動作に伴い蓄電エネルギーが消費されるため、動作時の効率低下を招いていた。そこで本研究では、電圧の高いセルの蓄電エネルギーを電圧の低いセルへ移すアクティブ型セルバランス回路として「LC方式セルバランス回路(以下LC方式と呼ぶ、図3)」に着目する。

LC方式では先行研究により、セルバランス動作時の損失を抵抗方式の20%程度に低減可能であることが明らかとなっており、高効率なセルバランス動作が実現できる。

一方、一般にアクティブ型セルバランス回路では、セルバランス動作時に流れる電流(以下均等化電流と呼ぶ)が大きく、この電流による電圧降下等の影響によって正確な蓄電セルの状態監視が困難であった。しかしながら、本研究で用いるLC方式ではセルバランス動作時に流れる電流を常に監視しているため、電流による電圧降下等の影響を演算によりキャンセルすることができれば、より正確な蓄電セルの状態監視が期待できる。

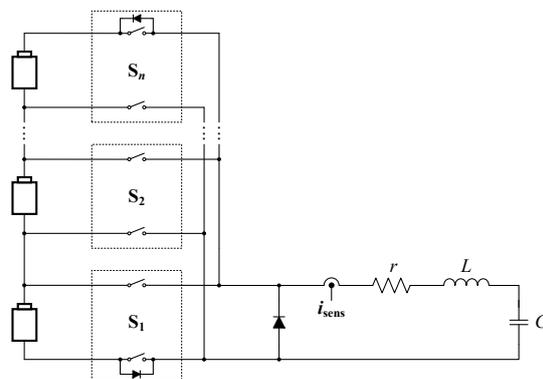


図3 LC方式セルバランス回路

3. 研究の方法

高効率なセルバランス機能と蓄電セルの常時監視機能を両立するため、①セルバランス動作が状態監視精度に与える影響の解明、②高効率なセルバランス機能と蓄電セルの常時監視機能を両立する制御手法の構築、③実機実験による制御手法の有用性検証を行う。

まず、セルバランス動作による蓄電セルの状態監視精度への影響を明らかにする。蓄電セルの温度変化等によるパラメータ変動も考慮した理論解析とシミュレーションにより、セルバランス動作が状態監視精度に与える影響を定量的に示す。

次に、高効率なセルバランス動作と蓄電セルの常時監視を両立する制御手法を構築する。先行研究から、LC方式ではダイオードD部の端子間電圧を計測することで、全てのセルの電圧を計測可能であることが示されている(図4)。そこで、計測した端子間電圧からセルバランス動作時の電流による影響を補正する制御手法を構築する。

最後のステップとして、制御手法の有用性を実機実験により検証する。

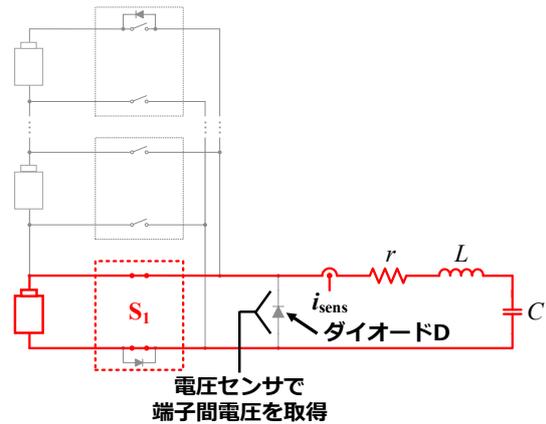


図4 LC方式によるセル電圧測定

4. 研究成果

まず、セルバランス動作時の電流(均等化電流)による蓄電セルの状態監視精度への影響について検討した。蓄電セルとして電気二重層キャパシタ(EDLC: Electric Double-Layer Capacitor)を想定し、外乱要因である温度変化に起因した蓄電セルの等価直列抵抗(ESR: Equivalent Series Resistance)成分と容量成分の変動、ならびに回路の寄生抵抗成分の変動を、それぞれデータシートと実測定から算出し、これらを考慮した理論解析とシミュレーションを行った。その結果、蓄電セルのESR成分による影響が最も大きく、最大で30%程度の推定誤差を生じることが明らかとなった(図5)。加えて、スイッチング素子(本研究ではMOSFETを用いた)のオン抵抗についても温度特性を取得し、推定精度への影響についてシミュレーションにより検討した。その結果、最大で1.5%程度の推定誤差を生じることが明らかとなった。

次に、均等化電流による影響を補正する制御手法を構築した。前述の検討結果から、主にESRによる影響が大きいことが明らかとなったため、蓄電セルとスイッチング素子のESRを予め取得し、センサにより取得した均等化電流 I_{eq} を用いて、 $V_{est} = V_{term} + (r_B + r_{sw}) \times I_{eq} \dots (1)$ により蓄電セルの開放電圧を推定することとした。ここで、 V_{est} : 推定した開放電圧、 V_{term} : センサにより取得した端子間電圧、 r_B : 蓄電セルESR、 r_{sw} : スwitching素子ESRである。

最後に、実機実験により制御手法の有用性を検証した。LC方式セルバランス回路を試作し、セルバランス動作中の端子間電圧から、(1)式を用いて蓄電セルの開放電圧を推定したところ、推定誤差を約1/10に低減可能であることを確認した(図6, 7)。

本研究では、均等化電流による影響を補償可能な制御手法について、実機検証までを行った。今後、各パラメータ変動に対する補償方法について検証が必要である。

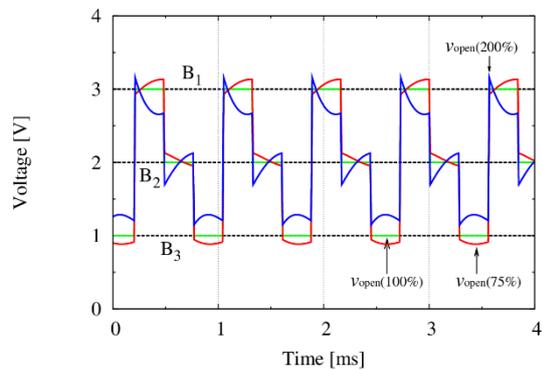


図5 蓄電セル ESR の温度特性による影響

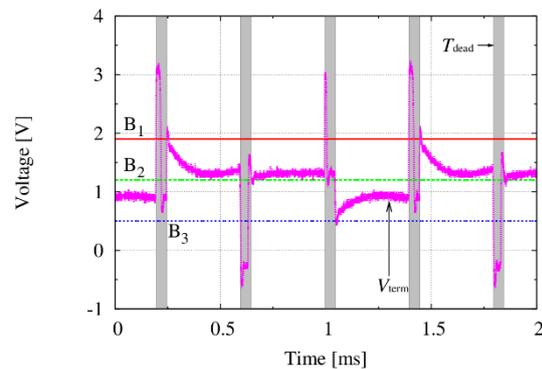


図6 取得した端子間電圧

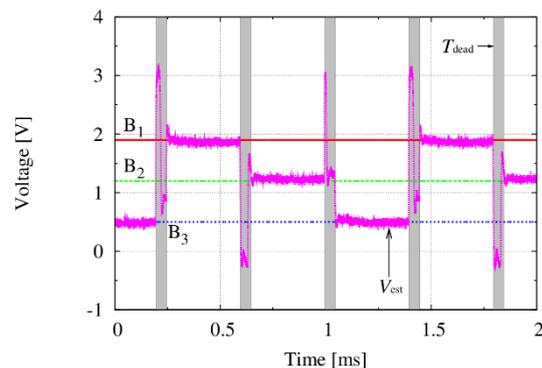


図7 推定した開放電圧

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 佐藤大記, 星伸一, 枘川重男	4. 巻 142
2. 論文標題 LC直列回路方式セル電圧均等化回路における均等化電流を利用した回路素子劣化判定手法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐藤大記, 枘川重男
2. 発表標題 LC直列回路方式セル電圧均等化回路における均等化電流を利用した回路素子劣化判定手法の実機検証
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤大記
2. 発表標題 回路中の寄生抵抗がLC直列回路方式セル電圧均等化回路の電圧推定精度に与える影響に関する一考察
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daiki SATOU
2. 発表標題 Real-time Battery Cell Voltage Measurement Method Using LC Series Circuit Type Cell Voltage Equalizer
3. 学会等名 The 4th International Future Energy Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤大記
2. 発表標題 蓄電セル温度がLC直列回路方式セル電圧監視回路の電圧推定精度に与える影響に関する一考察
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------