

氏名（本籍） 佐藤大記（群馬県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第1018号
学位授与の日付 2019年3月19日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目 セル電圧均等化回路の有用性向上に関する研究

論文審査委員 （主査）教授 星 伸一
教授 木村 真一 教授 永田 肇
教授 早瀬 仁則 教授 小泉 裕孝

論文内容の要旨

本論文は、電力貯蔵装置の需要拡大に伴って必要性が増しているセル電圧均等化回路の更なる有用性向上を目的とし、各種従来回路が抱える課題を克服した新たなセル電圧均等化回路の提案、および提案回路の価値の更なる向上を目的とした制御法ならびに回路構成に関する成果についてまとめたものである。

第1章では、電力貯蔵装置の需要の高まりから、セル電圧均等化回路が今後益々必要とされる背景について述べるとともに、従来回路が抱える課題を示し、本論文における研究の目的を明確化する。

第2章では、第1章にて示した従来回路の課題に対して、アクティブ方式の採用による蓄電エネルギーの有効活用と均等化電流の制御性、ならびに磁性素子の削減による回路規模の低減の全てを実現する新たなセル電圧均等化回路を提案する。更に、シミュレーションと実機実験により動作特性の検証を行い、セル電圧均等化回路としての提案回路の有用性を示す。加えて実機実験の結果から、提案回路は従来の抵抗消費型のセル電圧均等化回路と比較して、均等化動作の効率を約78pt向上可能であることを示す。また、提案回路の更なる有用性向上を目的として、提案回路が抱える課題についても合わせて整理する。

第3章では、第2章にて示した提案回路の課題の1つである均等化時間に対して、擬似乱数列を利用してセルの切替順をランダムとすることで、センサ等を追加することなく、制御法の変更のみで均等化時間を低減可能な制御法を提案する。更に、シミュレーションと実機実験により動作特性の検証を行い、提案する制御法の有用性について検討する。加えて実機実験の結果から、本章で提案する制御法を用いることで従来の制御法と比較して

均等化時間を約 87% に低減可能であること、本章で提案する制御法は各セル電圧のばらつき状況に依存することなく、平均的に均等化時間を低減可能であることを示す。

第 4 章では、第 2 章にて示した提案回路の課題の 1 つである均等化時間に対して、均等化動作時に流れる電流から各セル電圧の大小関係を推定し、バッテリーモジュール内で電圧が最も高いセルと最も低いセルとの間で選択的に均等化動作を行うことで、センサ等を追加することなく、制御法の変更のみで均等化時間を低減可能な制御法を提案する。更に、シミュレーションと実機実験により動作特性の検証を行い、提案する制御法の有用性について検討する。加えて実機実験の結果から、本章で提案する制御法を用いることで従来の制御法と比較して均等化時間を約 68% に低減可能であること、本章で提案する制御法は各セル電圧のばらつき状況に合わせた効率的な均等化動作が可能であることを示す。

第 5 章では、第 2 章にて示した提案回路の課題の 1 つである双方向スイッチの構成に対して、2 つの n チャネル MOS-FET を逆直列に接続した構成とすることで高い制御性を有するとともに、それらのゲート駆動回路を簡素化することが可能な回生型ゲート駆動回路およびその制御法を提案する。更に、シミュレーションと実機実験により動作特性の検証を行い、本章で提案する回生型ゲート駆動回路の有用性について検討する。シミュレーションおよび実機実験の結果から、本章で提案する回生型ゲート駆動回路を用いることで、バッテリーモジュールのセル数が増加した場合においても 3 つのコンバータのみでゲート駆動回路を構成することが可能であり、バッテリーモジュールが外部電源により充電されている場合においても安定的な均等化動作が可能であることを示す。

第 6 章では、第 2 章から第 5 章で得られた結論を総括するとともに、今後の展望について述べる。

以上

論文審査の結果の要旨

自然エネルギー由来の発電は、時々刻々と発電状態が変わるため、電力の需給バランス調整のため何らかのエネルギーバッファを併用することが望ましい。このエネルギーバッファの 1 つに蓄電池がある。また、近年、ハイブリッド自動車をはじめとする各種電気自動車の普及が進んでいるが、この電気自動車も、制動時に車体の持つ運動エネルギーを一時的に蓄電池に蓄え、走行時に再利用することで、燃費を向上させている。このため、蓄電池システムへの期待が高まっている。これらのシステムでは、多数のセルを直列接続した蓄電池が用いられているが、この蓄電池の性能を最大限発揮させるためには、セル電圧均等化回路が必要となる。本研究は、セル電圧均等化回路の有用性向上を目的に行われており、本論文は、従来回路が抱える課題の中から均等化動作時の効率、均等化動作時に流れる電流の動的な制御、及び一時的なエネルギー貯蔵のための受動素子数に着目した新たなセル電圧均等化回路として LC 直列回路方式セル電圧均等化回路

(以下、提案回路と呼ぶ)を提案し、その提案回路の価値の向上を目的とした制御法及び回路構成も併せて提案している。本論文では、これらの成果が以下の6章にまとめられている。

第1章では、蓄電装置の需要増加など、セル電圧均等化回路の必要性が増している背景と、これまでに各所で提案されているセル電圧均等化回路方式(以下、従来回路と呼ぶ)の特徴と課題を示すことで、本論文における研究の目的と意義が明確にされている。

第2章では、第1章にて示した従来回路が抱える課題に対して、LC直列回路方式セル電圧均等化回路が提案され、シミュレーションと実機実験により得られた均等化動作特性の検証結果が示されている。その結果から、提案回路は従来のパッシブ型のセル電圧均等化回路と比較して、均等化動作の効率を向上可能であることが示されている。一方で、均等化に時間を要し、双方向スイッチを使用していることが、提案回路特有の課題として提起されている。

第3章では、第2章にて示した提案回路が抱える課題の1つである均等化時間に対して、擬似乱数列を利用してセルをランダムに切り替えることで各バッテリーセルの初期状態による影響を小さくし、均等化時間を短縮する制御法(以下、疑似乱数法)が提案されている。この疑似乱数法の均等化動作特性は、シミュレーションと実機実験により検証が行われ、疑似乱数法を用いることで、セルをシーケンシャルに切り替える従来の制御法と比較して、平均的な均等化時間を短縮可能であることが示されている。

第4章では、第3章とは別の均等化時間短縮法として、均等化動作時に流れる電流の向きから各バッテリーセル電圧の大小関係を推定し、バッテリーモジュール内の最高電圧のセルと最低電圧のセル間で優先的に均等化動作を行うことで均等化時間短縮を図る制御法(以下、大小関係推定法)が提案されている。この大小関係推定法の均等化動作特性は、シミュレーション及び実機実験により検証が行われ、大小関係推定法を用いることで従来の制御法と比較して均等化時間を短縮可能であること、また各バッテリーセル電圧のばらつき状況に合わせた均等化動作が可能であることが示されている。

第5章では、第2章にて示した提案回路が抱えるもう一つの課題である双方向スイッチの構成に対して、2つのnチャネルMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)を逆直列に接続した構成とすることで高い制御性を有するとともに、それらのゲート駆動回路用コンバータ数を削減可能な再生型ゲート駆動回路と、その制御法が提案されている。さらに、シミュレーション及び実機実験により均等化動作特性並びにゲート駆動回路用電源の生成動作特性の検証が行われ、再生型ゲート駆動回路を用いることでバッテリーモジュールのセル数が増加した場合においても3つのコンバータのみで提案回路のゲート駆動回路を構成することが可能であること、バッテリーモジュールが外部電源により充電されている場合においては安定的な均等化動作並びにゲート駆動回路用電源の生成動作が可能であることが示されている。

第6章では、総括と今後の展望が述べられている。

本論文で提案されたセル電圧均等化回路は、従来回路が抱える複数の課題を解決でき

る一方で、均等化時間や双方向スイッチを用いる必要がある等の課題を有しているが、この課題についても、改善法の提案が行われ、シミュレーション及び実験により、その有効性が明らかにされている。このことは、セル電圧均等化回路の有用性向上に寄与するものである。よって、本論文が博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。