

報告番号

甲 第 13301 号

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **バッテリーを備えた多段 FET 双方向コンバータによるエネルギー管理蓄電システムに関する研究
(A Study on Energy Management Storage System using Multi-stage FET Bidirectional Converter with Battery)**

氏 名 石倉 祐樹

論 文 内 容 の 要 旨

本論文では、家庭用電力貯蔵システムであるエネルギー管理蓄電システムに関して、システムの高性能化および実用性の向上を目的として、総合エネルギー効率を高める技術開発に関する研究について論じる。研究対象とするエネルギー管理蓄電システムは、パワーエレクトロニクス回路システムであり、パワー半導体、パワーインダクタ、バッテリー、キャパシタなどで構成される。パワーエレクトロニクスは、電気工学、電子工学、制御工学を扱う総合技術である。応用においては、磁気、化学、材料、通信といった様々な技術を融合させながら発展を続けている。パワーエレクトロニクスは、エネルギー管理蓄電システムのコア技術として位置付けられる。エネルギー管理蓄電システムにおける先行研究では、電力変換回路、パワー半導体、パワーインダクタ、バッテリーといった個別要素技術の高性能化について広く研究が進められている。

本研究では、電力変換回路、パワー半導体、パワーインダクタ、バッテリーといった個別要素技術の性能向上だけでなく、個別要素技術を有機的に結合してシステム全体を統合し、個別最適から全体最適に発展させ、エネルギー管理蓄電システムの高性能化を目指す。具体的には、(1)パワー半導体応用技術、(2)パワーインダクタ技術、(3)バッテリー応用技術について研究し、それぞれを有機的に結合して技術革新を図り、エネルギー管理蓄電システムにおける総合エネルギーの高効率化を目指す。

第1章では、研究の背景、研究の目的、研究の対象範囲について述べ、研究方針を示している。

第2章では、エネルギーマネジメント蓄電システムに関する先行研究と研究アプローチについて述べている。本論文における有機的結合の概念を示し、電力変換回路技術、(1)パワー半導体応用技術、(2)パワーインダクタ技術、(3)バッテリー応用技術に重点を置き、電力変換回路の高性能化やエネルギーマネジメント蓄電システム全体における総合エネルギーの高効率化について研究することを述べている。また、(1)パワー半導体応用技術、(2)パワーインダクタ技術、(3)バッテリー応用技術について、課題と課題解決への取り組みを述べ、研究対象とするエネルギーマネジメント蓄電システムの構成と動作を示し、双方向コンバータの回路構成と電力変換動作を解説している。

第3章では、パワー半導体応用技術に関する研究について論じる。システム全体における総合エネルギーの高効率に向けて、電力変換回路の高性能化に関して、特に、パワー半導体における電力損失の低減を目指して、多段FET双方向コンバータの開発について述べる。多段FET双方向コンバータは、複数の低耐圧FETを直列接続して構成され、電圧平均化機能を有するバランスキャパシタを備える。コンバータの具体的な設計前に電力損失を見積もるコンバータ性能指標FOM (Figure of merit) を用いて電力損失を計算し、4石の150V耐圧FETを用いた提案するコンバータは、1石の650V耐圧SiC-FETを用いたコンバータと比較して、電力損失を低減できる可能性を示す。実用的な製品技術として、多段FET駆動技術と電圧バランス制御機能について述べ、コンバータの動作原理などを示す。多段FET駆動技術では、変圧器や高耐圧プロセスICを必要とせず、グラウンドレベルの異なる複数のFETを1つの制御電源で駆動する。電圧バランス制御機能では、バリアブルキャパシタで構成する遅延回路とフォトカプラによるアナログ帰還回路を用いてゲート信号のタイミングを調整し、複数のFETのオフ期間に加わるドレイン電圧を均一化する。解析では、電圧バランス機能や多段FET駆動回路などの諸特性を明らかにし、実験では、多段FET双方向コンバータを動作させ、電力変換動作や電力変換効率などを検討し、出力電力170Wから1000Wにおいて、電力変換効率98%以上、最高99.2%を達成し、開発した多段FET双方向コンバータの有効性を明らかにする。

第4章では、パワーインダクタ技術に関する研究について論じる。システム全体における総合エネルギーの高効率化に向けて、特に、パワーインダクタにおける電力損失の低減に関して、電力損失の低減と電力損失の把握を実現する手段として、複合磁性材料パワーインダクタ開発と、パワーインダクタの電力損失算出法開発について述べる。複合磁性材料パワーインダクタ開発では、比透磁率の直流重畳特性を考慮したパワーインダクタの磁気設計方法を提案し、実験では、インダクタの電流リップルにおいて、設計値と実測値がほぼ一致することを示し、提案する磁気設計法の有効性を明らかにする。また、複合磁性

材料パワーインダクタを用いて構成したコンバータは、単一磁性材料を用いたパワーインダクタで構成した 2 種類のコンバータとそれぞれ比較して、軽負荷または重負荷において電力変換効率を向上し、広い負荷範囲において、平均的に高い電力変換効率を維持できることを示す。パワーインダクタの電力損失算出法開発では、2つの鉄損算出法、分割鉄損算出法と方形波鉄損算出法を提案する。分割鉄損算出法では、磁気回路モデルを用いて磁束密度の構造依存性を解析し、パワーインダクタの鉄損を算出する。実験では、分割鉄損算出法を用いた鉄損算出値と平均磁束密度を用いた鉄損算出値を比較評価し、分割鉄損算出法の有効性を明らかにする。方形波鉄損算出法では、パワーインダクタを励磁する電圧波形に対して、正弦波と方形波の違いによる B-H ループを解析し、鉄損を算出する。実験では、方形波鉄損算出法とスタインメッツの実験式を用いた鉄損算出法について、鉄損算出精度と算出手順を比較評価し、方形波鉄損算出法の有効性を明らかにする。

第 5 章では、バッテリー応用技術に関する研究について論じる。エネルギーマネジメント蓄電システムにおける高性能化に向けて、特に、システム全体における総合エネルギーの高効率化を目指して、バッテリー性能を最大に引き出す電力制御法、すなわちバッテリーにおける充放電の電力管理と充放電の回数管理によるバッテリー電力の有効活用について述べる。バッテリーの化学特性で決まる内部抵抗を電気特性として評価し、バッテリーの充電特性に応じて充電電流を調整する電力制御を実行して、エネルギーマネジメント蓄電システムにおけるバッテリーの充電効率を向上できることを示す。バッテリー FORTELION®を用いたエネルギーマネジメント蓄電システムにおいて、提案する電力制御法により 1 日 2 サイクルのバッテリー充放電を行い、バッテリーの充放電回数を増やしても、エネルギーマネジメント蓄電システムの寿命は、約 20 年が期待できることを示す。バッテリー等価回路モデルとコンバータの等価回路モデルを用いて、エネルギーマネジメント蓄電システムにおける伝達特性を解析し、バッテリーと双方向コンバータにより構成されるシステムの安定動作条件を導出する。提案する電力制御法を適用した多段 FET 双方向コンバータを用いた開発システムについて、バッテリー容量 2.3kWh とコンバータ出力電力 2.4kW において、コンバータの電力変換効率とバッテリーの充電効率より総合エネルギー効率を解析し、現行システムと比較して 4.3 ポイント高い総合エネルギー効率 97.0%を達成し、開発システムの有効性を明らかにする。

第 6 章では、本研究の成果と開発したエネルギーマネジメント蓄電システムの展望について、総括する。