

2017 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関 名 (大学、大学院、研究所 名)	東京工業大学
職 位 または 役 職	准教授
氏 名	萩原 誠

1. 研究題目

蓄電池を車載した電気鉄道用モータドライブシステムの小型化・軽量化・高性能化に関する研究

2. 研究目的

近年、電気鉄道において蓄電池を車載したモータドライブシステムの導入が進んでいる。蓄電池は直流出力であるため、三相交流モータ(通常、三相誘導電動機)に電力を供給する際、半導体電力変換器(双方向チョッパと三相インバータ)を使用する必要がある。しかし、双方向チョッパに使用するインダクタがシステムの大型化・高重量化を引き起こすという問題が存在する。また、高インダクタンス値を有する従来型チョッパでは高速電流制御の実現が難しいため、チョッパ自体がモータドライブの高性能化を妨げる主要因となっていた。更に、蓄電池側で短絡事故が発生した場合、過大な短絡電流が発生するため、システムを保護する直流遮断器が必要不可欠である。しかし、直流遮断器の設置はシステムの高コスト化・高重量化・信頼性低下を引き起こす要因となる。

本研究では、インダクタの劇的な小型・軽量化・高パワー密度化、およびモータドライブの高性能化を同時に実現可能な新しいモータドライブシステムの提案・検討を行うことを主目的とする。提案システムは、電力変換器のスイッチング周波数を増加させることなく低インダクタンス化を実現できる点に特長があり、小型・軽量化、直流遮断器除去、モータ高性能化を同時に実現できる。しかし、上記システムを用いたモータドライブシステムに関する検討を行っているグループは、世界を含めて申請者の研究グループのみであり、制御法や動作特性に関しては不明瞭な点が多い。本研究では、「PSCAD」を用いたコンピュータシミュレーション、および 150 V ミニモデルを用いた実験検証によりシステムの各種制御法(例えば、直流コンデンサ電圧制御法)の確立を実現する。次に、負荷急変時・過渡時における動作特性をシミュレーションと実験の両面から検討する。最後に、従来方式と比較しどの程度小型・軽量化・高パワー密度化が実現できるか定量的検証を行う。具体的には、使用するパワーデバイス、インダクタ、コンデンサ、放熱部(ヒートシンク)、センサ類を含めた重量・体積を包括的に評価する。コスト削減効果に関しても、詳細に検討する。

3. 研究内容及び成果

本年度は、ミニモデルを用いた実験的検証を主に行った。その結果、前述の目的で記した各種制御法（電流制御法と直流コンデンサ電圧制御法）の確立に成功し、実験によりその有効性を確認できた。図 1 に定常特性の実験波形を示す。図 1 に実験に用いた回路構成を、図 2 に定常特性を示す。ただし、図 1 における各セルは単相フルブリッジ変換器を適用している。

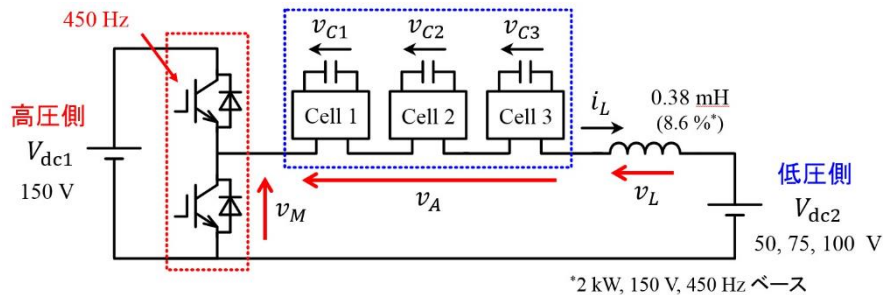


図 1 実験に用いたミニモデルの構成

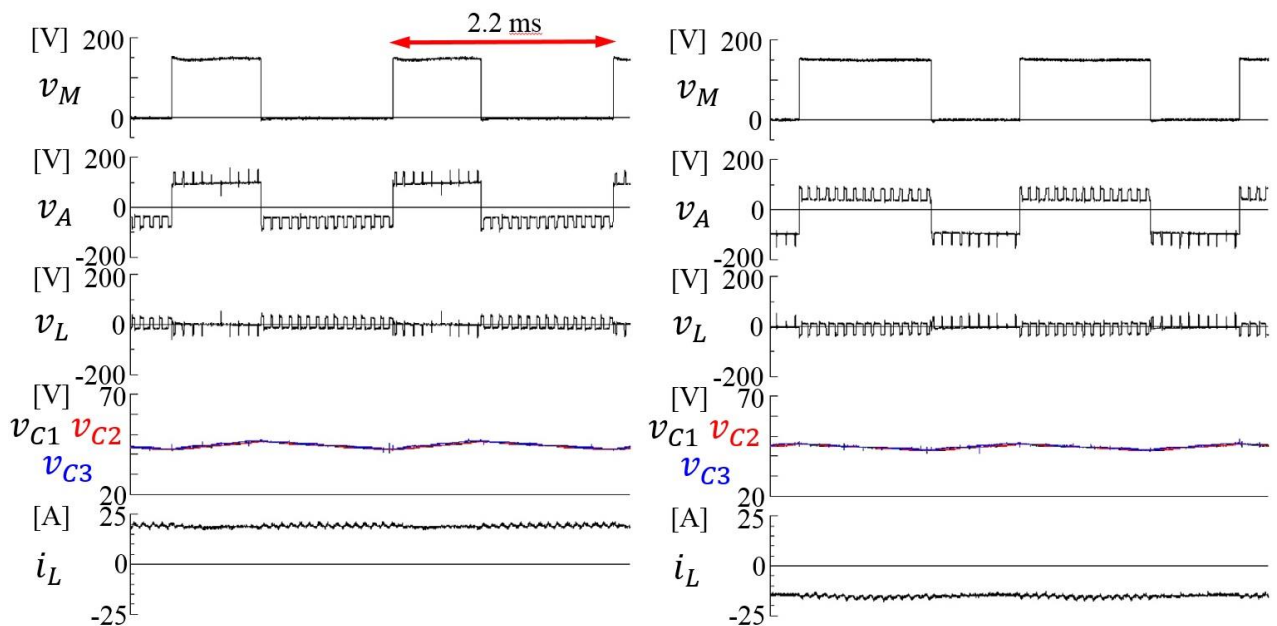


図 2 定常特性（左側：降圧チョップパ動作，右側：昇圧チョップパ動作）

インダクタンスに関しては、従来回路と比較し 1/65 以下に低減可能であることを示した。また、始動特性・過渡特性・遮断特性に関して実験的検討を行った。始動特性に関しては、外部充電回路を用いずに各直流コンデンサの初期充電が可能な初期充電法を提案し、ミニモデルを用いた実験検証により良好に動作することを確認した。過渡特性に関しては、電流急変時と電圧急変時の両者の検討を行った。電流急変時に関しては、200 ms で急速に指令値を変更した場合も良好に電流制御が実現できることを確認した。電圧急変時に関しては、最も厳しい電圧急変であるステップ変化が高圧側電源・低圧側電源の両者に生じた場合においても、過電圧・過電流が生じることなく安定に運転継続が可能であることを実験的に示した。遮断特性に関しては、実際に実験により短絡事故を模擬し、直流遮断器として良好に動作することを確認した。

研究成果としては、2018 年 1 月に電気学会研究会（6 ページ），2018 年 3 月に電気学会全国大会（2 ページ）にて発表を行った。また、2017 年 10 月には、本研究分野で世界的に最も権威がある ECCE2017 のオーラルセッションで発表を行った。更に、本研究成果は電気学会産業応用部門誌に投稿を行い（ページ数 11 ページ），2018 年 7 月号に掲載された。

4. 今後の研究の見通し

今後は今年度検討を行った双方向チョッパと、三相インバータを組み合わせることで、モータドライブ用変換器としての特性を評価する予定であるが、具体的には以下に関して検討を行う予定である。

「小型化・軽量化・高パワー密度化の定量化」

図1はインダクタの小型・軽量化が実現できる点に特長があり、システム全体の小型化・軽量化・高パワー密度化が期待できる。しかし、小型化・軽量化・高パワー密度化の定量化は未達成であるため、理論解析を通じて定量化を実現する。始めに、ヒートシンク等冷却装置の重量・体積を評価関数とすることで、静電容量を最適化する。インダクタに関しては、各種鉄心材料(珪素鋼板、フェライト等)を想定した設計を行い、材料・体積・重量を最適化する。設計の有効性・妥当性は実規模級インダクタを実際に製造することで確認する。冷却方式に関しては、一般的な空冷方式と水冷方式の得失に関して検討を行い、図1に最適な冷却手法を選定する。

「多重化技術適用による高圧側電流の完全直流化実現」

複数の双方向チョッパを並列接続することで、定格電力増大とリプル電流低減を同時に実現できることが知られている。上記は並列多重化技術と呼ばれ、電気自動車の高出力化実現に必要な技術である。多重化技術を従来型チョッパに適用した場合、高圧側電流にリプル成分が残存し、蓄電池の劣化を引き起こすという問題が存在した。本研究では、最新の制御技術を図1に適用することで制御による完全直流化を実現する。その結果、蓄電池の劣化問題を解決する。

「電気自動車用モータドライブへの応用」

図1を用いた電気自動車用モータドライブの実験的検証を行う。三相インバータと三相電動機を実際に適用し、より実際に近い状況下で総合的評価を行う。特に、モータ負荷が急変(50%程度)した場合の変換器挙動に着目し、システム全体で安定に動作可能な制御系を構築する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. 大西晴菜, 萩原誠:「補助変換器を有する双方向チョッパの制御法と動作検証」, 電気学会産業応用部門誌, **査読有**, 138巻7号, pp. 644-654, 2018.
2. Hamzeh J. Ahmad, Haruna Ohnishi, Makoto Hagiwara, “Start-Up and Transient Operation of a Bidirectional Chopper with an Auxiliary Converter,” The 2018 International Power Electronics Conference -ECCE ASIA-, IEEJ, pp. 3273-3279, **査読有**, May 2018.
3. 大西晴菜, 萩原誠:「補助変換器を有する双方向チョッパの始動法と過渡特性」電気学会半導体電力変換研究会, SPC-18-051, 2018年1月
4. 大西晴菜, 萩原誠:「補助変換器を有する双方向チョッパの零電力伝送時の制御法」電気学会全国大会, 4-085, 2018年3月
5. 宮葉啓彰, 萩原誠:「補助変換器を有する双方向チョッパの直流遮断器動作」電気学会産業応用部門大会, 1-75, 2018年8月