

## 2018年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名	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150V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。さらに、インダクタの小型・軽量化が実現できると同時に、電流零でスイッチングを行う「ソフトスイッチング」を実現可能な新直流-直流変換器方式についても同様に検討を行う。

### 3. 研究内容及び成果

昨年度は、変換器単体での動作検証を行ったが、実際の応用では多段変換器を並列多重(インターリーブ)して使用することが想定される。上記を考慮し、本研究では 3 段インターリーブ構成の実験を行った。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、動作条件は  $v_1 = 150$  [V],  $v_2 = 75$  [V],  $i_2 = 30$  [A]とした。

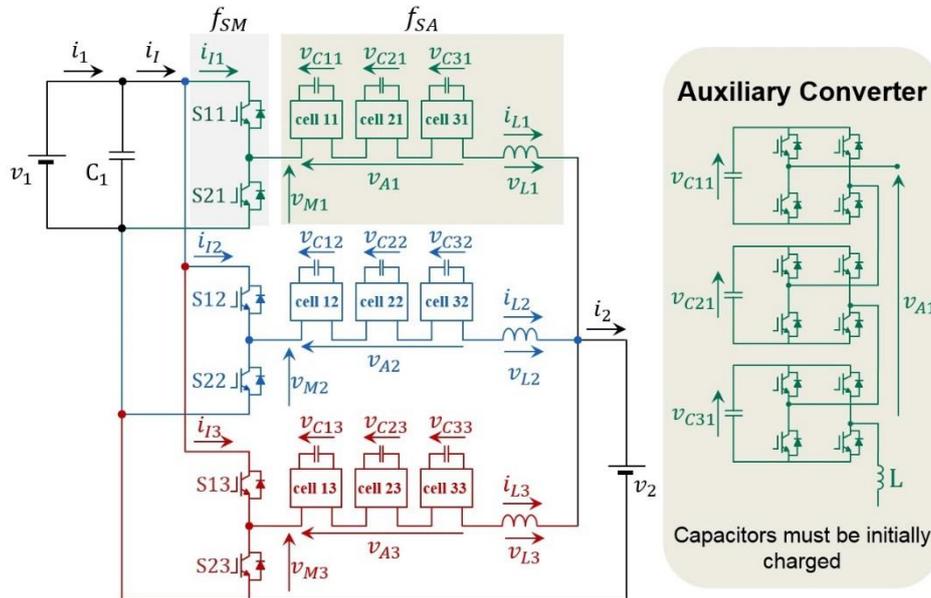


図 1 実験に用いた回路構成

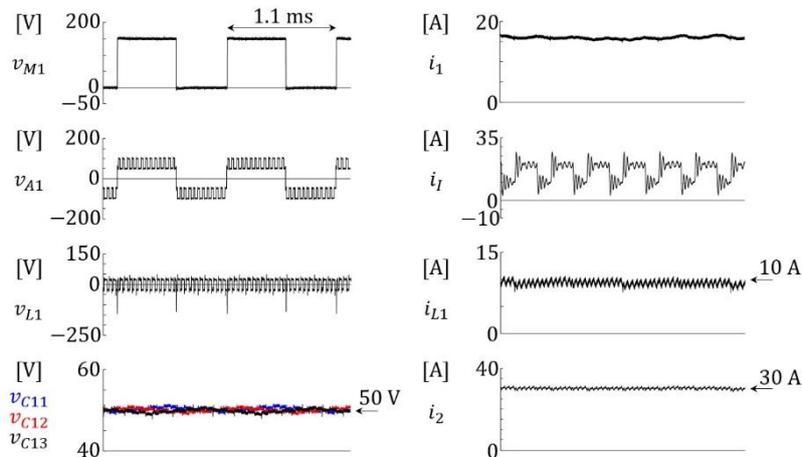


図 2 定常特性 ( $v_1 = 150$  [V],  $v_2 = 75$  [V],  $i_2 = 30$  [A])

図 2 において、高圧側電流  $i_1$ , 低圧側電流  $i_2$  共にスイッチングリップル成分の少ない直流電流となることを確認した。また、直流コンデンサ電圧についても指令値 50 V に制御できることを確認した。また、電流指令値急変の過渡特性についても検討を行い、良好な過渡特性を確認した。上記結果は、パワーエレクトロニクスの権威ある国際会議である APEC2020 にて発表予定である。

本年度は、図 1 以外にもインダクタの小型・軽量化を実現可能であり、同時にスイッチング損失を提言できる新しい回路方式に関して検討を行った。上記は正弦波状に電流を制御することで、任意の負荷状態において零電流スイッチング、即ち「ソフトスイッチング」を実現できる点に特長がある。上記変換器の動作原理に関しては、「PSCAD」を用いたシミュレーションにより確認しており、2019 年 1 月に電気学会研究会(6 ページ), 2019 年 8 月に電気学会産業応用部門大会(4 ページ)にて発表を行った。

#### 4. 今後の研究の見通し

今後は、図 1 に関する変換器効率・重量に関する定量的評価に関する検討と、本年度より新たに始めた新回路方式（図 3）に関する実験検証を行うことが主目的となる。具体的には、以下に関して検討を行う予定である。

##### 「変換器効率・重量の定量的評価」

図 1 の変換器はインダクタの小型・軽量化を実現できるが、重量・体積の定量的評価は現在まで未達成である。また、変換器効率に関してもどの程度の効率が達成可能か、現在まで未解明である。上記を考慮し、従来回路方式と本回路方式のインダクタの重量・体積比較を行う。鉄道用電力変換器に使用されるインダクタは空芯インダクタが使用されることから、主に銅線の重量・体積比較を行う予定である。変換器効率に関しては、一般的なデータシートをベースとした損失推定法を適用し、図 1 の変換器が小型・軽量化と同時に高効率運転を実現できることを示す。

##### 「新直流-直流変換器の実験検証」

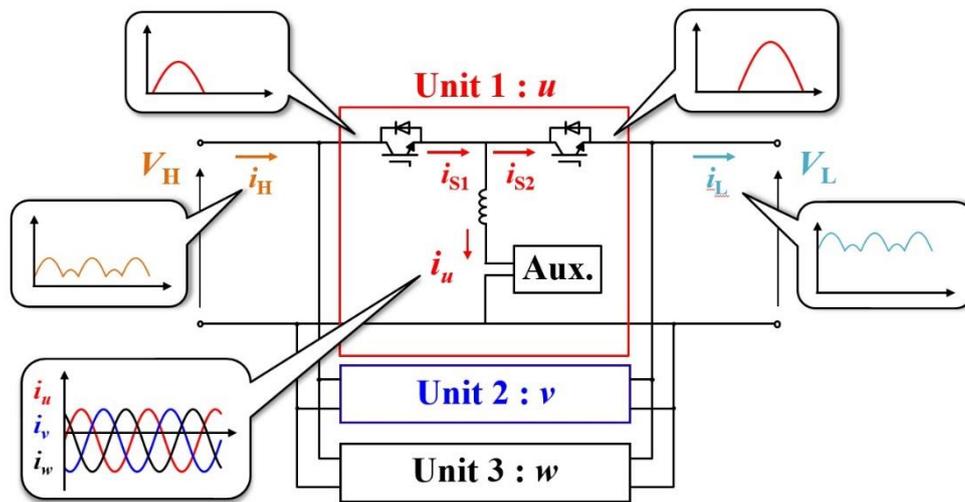


図 3 損失低減可能な新直流-直流変換器の構成

今後は、図 3 に示す損失低減可能な新直流-直流変換器の実験検証を行う。電流・電圧制御法に関しては既に検証済みであるため、2kW 級ミニモデルを用いた実験検証を行う。実験結果の一部（主に定常特性）は既に取得済みであり、2020 年 1 月の電気学会研究会、および以降の国内・国際会議で順次発表を行う予定である。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. 手崎和明, 萩原誠: 「スイッチトキャパシタ変換器をベースとした高圧・大容量双方向非絶縁形 DC-DC コンバータの制御法と動作検証」 電気学会半導体電力変換研究会, SPC-19-018, 2019 年 1 月
2. 手崎和明, 萩原誠: 「スイッチトキャパシタ変換器をベースとした双方向 DC-DC コンバータのクラス数に関する検討」 電気学会産業応用部門大会, 1-5, pp. I-57-I-60 2019 年 8 月
3. Hamzeh J. Ahmad, Makoto Hagiwara, “An Interleaved Bidirectional Chopper with an Auxiliary Converter,” APEC2020, 2020 年 3 月発表予定