

令和 4 年 5 月 2 日現在

機関番号：12608
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2019～2021
課題番号：19H02125
研究課題名(和文) 電気自動車・電動航空機への適用を目的とした大容量直流-直流変換器に関する研究

研究課題名(英文) High-power dc-dc converter for electric vehicles and electric aircraft

研究代表者
萩原 誠 (Hagiwara, Makoto)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：20436710
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、近い将来に電気自動車・電動航空機など移動体への適用が期待される100kW級の大容量半導体電力変換技術に着目し、小型・軽量化と低損失化(大容量化)を同時に実現可能な直流-直流変換器の提案を行い、その有効性・妥当性に関してミニモデルを用いた実験、およびコンピュータシミュレーションの両面から検証し、電気自動車・電動航空機の普及拡大、地球環境改善、および21世紀型省エネ社会実現に寄与することを主目的とする。その結果、良好な定常・過渡特性が得られ、同時に高効率化・高電力密度化が実現できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義
従来、半導体電力変換器の小型・軽量化は、スイッチング周波数を増加させることで実現してきたが、本研究で検討する直流-直流変換器は、最新回路技術・制御技術を活用することで、スイッチング周波数を増加させずに小型化・軽量化を実現できる点に学術的意義が存在する。換言すると、スイッチング周波数増加に頼らずに、最新回路技術と最新制御技術で小型化・軽量化・低損失化実現を試みる点に本研究の学術的特色がある。脱炭素化社会実現に向け電気自動車・電動航空機の普及拡大は必要不可欠であり、小型・軽量化と高効率化・高電力密度化を高い次元で実現可能な本回路が果たすべき意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：This research outcome is expected to be applied to mobile bodies such as electric vehicles and electric aircrafts in the near future with a power rating of 100 kW. Attention is paid to large-capacity power electronics technology and a dc-dc converter that can realize small size, light weight, and low loss is proposed. The validity of the dc-dc converter is verified experimentally using a downscaled model and computer simulation using PSCAD, for contributing to the expansion of electrical vehicles and aircrafts, the improvement of the global environment, and the realization of a energy-saving society. It has been confirmed that the proposed dc-dc converter can achieve good steady and transient performance while achieving high efficiency and high power density.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス 直流-直流変換器 電気自動車 電動航空機

1. 研究開始当初の背景

地球環境改善と省エネ社会実現の観点から、電気自動車(EV: Electric Vehicle)と電動航空機(EA: Electric Aircraft)に対する期待が世界的に高まっている。一方、電気自動車や電動航空機の普及を加速させるためには、電力変換器の一層の小型化、軽量化、低損失化、大容量化の実現が必要不可欠である。電気自動車と電動航空機は、リチウムイオン電池や燃料電池等の蓄電池を電源媒体とし、交流電動機を駆動することで動力を得る。その際、半導体電力変換器を適用することで、直流電圧を三相交流電圧に変換する。

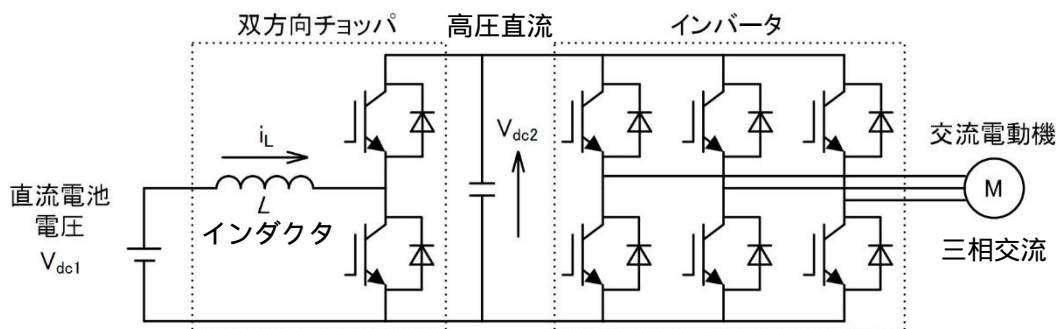


図1 電気自動車用半導体電力変換器の構成例

図1に、電気自動車用半導体電力変換器の構成例を示す。蓄電池の直流電圧 V_{dc1} (通常 300 V から 400 V) を、双方向チョッパ(非絶縁型直流-直流変換器)を用いて別の直流電圧 V_{dc2} に昇圧する。その後、インバータを用いて三相交流電圧に変換する。双方向チョッパは省略される場合もあるが、大容量化実現には高圧化が必要不可欠である。例えば、トヨタ社製3代目プリウスの場合 650 V に昇圧される。現在、実際に搭載されている双方向チョッパの変換器容量は 60 kW 程度であるが、ガソリン車・ディーゼル車に匹敵する性能を実現するためには 100 kW 以上必要と言われており、将来的には数 100 kW になると考えられている。一方、移動体に双方向チョッパを搭載する場合、変換器の小型化・軽量化は必要不可欠であり、特にインダクタの小型化・軽量化が要求される。パワーデバイスのスイッチング周波数を増加させることで上記目的を実現できるが、スイッチング損失と電磁ノイズが増大するため、低損失化・大容量化実現が困難という問題が存在する。一方、損失低減実現のため電流零時にスイッチングを行う「ソフトスイッチング」技術が存在するが、受動素子を用いたソフトスイッチング技術は、すべての負荷でソフトスイッチングを実現できないという課題があり、大容量チョッパ回路における適用例は少ないのが現状である。

2. 研究の目的

以上より、双方向チョッパ(直流-直流変換器)の小型化・軽量化実現と低損失化・大容量化実現の間には明確なトレードオフが存在する一方、スイッチング周波数を増加することなく、どのように小型化・軽量化を実現し、同時に低損失化・大容量化を実現するかが、電気自動車・電動航空機の普及拡大に必要不可欠である。

本研究の目的は、インダクタの小型化・軽量化を実現すると同時に、方形波電流の発生を防止し、主変換器パワーデバイスにおいて任意の負荷でソフトスイッチングを実現可能な、直流-直流変換器の提案と制御法の確立、および実験による動作検証を行うことである。具体的には、図2に示す回路を検討対象とした。図2(a)は、非絶縁型の直流-直流変換器であり、主変換器と補助変換器より構成する。主変換器は、単方向の電流遮断が可能な単方向スイッチ $S1u$ と $S2u$ から構成する。接続点 A, B 間にはインダクタと複数台の双方向チョッパをカスケード接続した補助変換器を接続する。双方向チョッパに使用するパワーデバイスには、低損失でスイッチング特性の優れた低圧パワーデバイスを適用できる。また、補助変換器を可変制御電圧源として動作させ、インダクタ電流を正弦波状に制御することで、高圧側・低圧側電源から方形波電流を除去し、同時にソフトスイッチングを実現できる。図2(b)も図2(a)と同様の動作を行うが、双方向に電流遮断が可能な双方向スイッチを4箇所配置することで、原理的に入出力電源間の電氣的絶縁を実現できる。その結果、高コスト・高重量・高体積な変圧器を用いずに電氣的絶縁を達成できる。

図2の電流・電圧制御法、始動法を含む制御法に関しては未確立であり、動作原理検証に必要な不可欠な実験検証も未達成である。そこで、本研究では、図2(a)と図2(b)の制御法を確立し、コンピュータシミュレーションとミニモデルを用いた実験検証を通じて定常特性、始動特性、過渡特性の検証を行い、図2の有用性・妥当性を明らかにする。具体的な検討項目は、以下の通りで

ある。

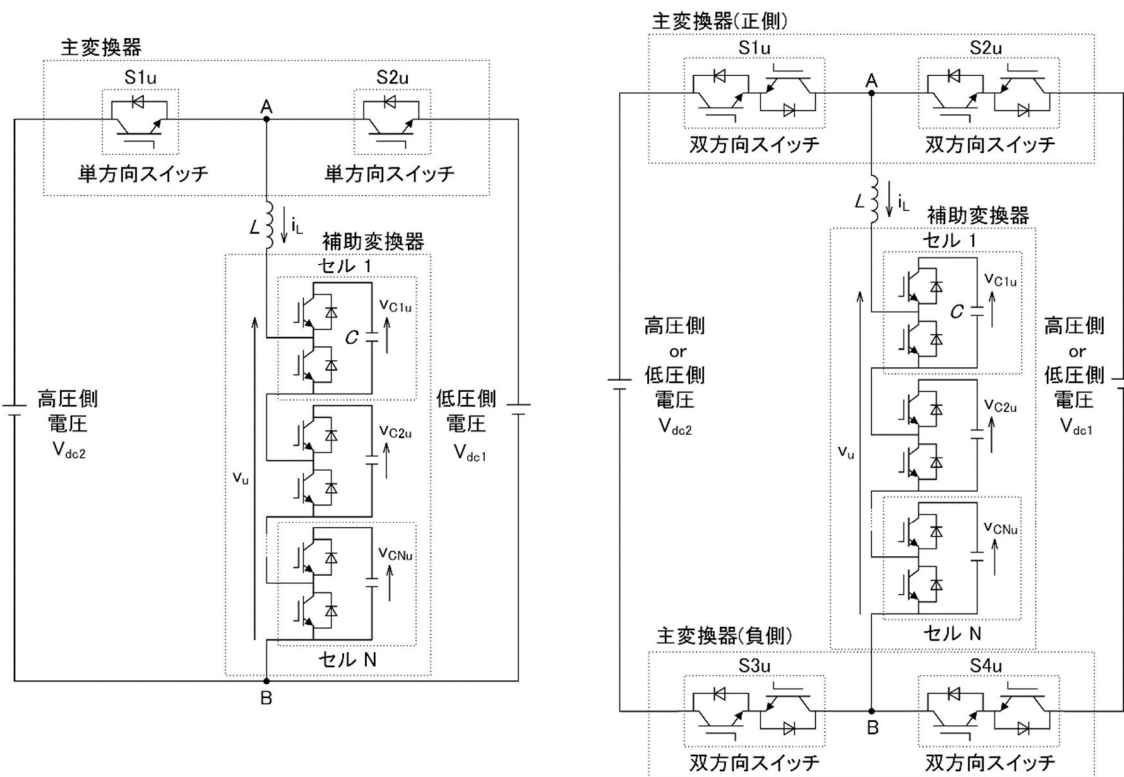


図2 本研究で検討する直流-直流変換器の主回路構成：(a)非絶縁型，(b)絶縁型

- 【1】 制御法の確立・検証：図2の正常動作には，安定な始動，インダクタ電流の制御，直流コンデンサ電圧の制御が必要不可欠である。特に，インダクタ電流は500 Hz以上の正弦波状となるため，制御上の困難が予想される。本研究では，電力系統で一般に用いられる座標変換をベースとした電流制御系を導入することで，高周波電流の制御系確立を試みる。制御系の検証は，コンピュータシミュレーションにより行う。
- 【2】 ミニモデルによる実験検証：図2(a)，(b)共にミニモデルを用いた実験検証を行う。ミニモデル主回路に関しては，実績のあるメーカー製の回路ブロックを複数組み合わせることで構築した。定常特性，始動特性，指令値急変時・電源急変時の過渡特性の実験検証を行い，本回路の有効性・制御法の妥当性を明らかにする。また，シミュレーションと実験の比較を通じて両者の信頼性を確認する。
- 【3】 100 kW変換器のシミュレーション：実際の電力変換器は100 kW級となることが想定されるため，100 kW変換器のシミュレーションを行う。初めに，スイッチング周波数，インダクタンス，静電容量の最適化を行い，定常時・過渡時の挙動を検証する。

3. 研究の方法

研究は，PSCADを用いたコンピュータシミュレーション，ミニモデルを用いた実験検証，MATLABを用いた数値解析により実施する。研究体制は，当方（萩原）が研究代表者を担当し，佐野テニユアトラック助教が研究分担者を担当した。また，当研究室の大学院生が研究協力者を担当した。具体的な役割は，研究の総括（萩原），制御法の確立（萩原），実験検証（大学院生，佐野），100 kW級変換器の損失解析（大学院生）とした。佐野助教は，主に大学院生への実験指導を行った。

4. 研究成果

2019年度は，本研究で提案する非絶縁型直流-直流変換器のコンピュータシミュレーション，および実験検証を行うことを主目的とした。具体的には，初めに変換器制御法の確立・検証を行った。上記直流-直流変換器の正常動作には，安定な始動，インダクタ電流の制御，直流コンデンサ電圧の制御が必要不可欠である。特に，インダクタ電流は500 Hz以上の正弦波状となるため，制御上の困難が予想される。本研究では，電力系統で一般に用いられる座標変換をベースとした電流制御系を導入することで，高周波電流の制御系確立を試みた。直流コンデンサ電圧制御に関しては，階層型の制御法を採用することで複数の直流コンデンサ電圧を安定にバランスさせる。始動法に関しては，変換器に使用する各直流コンデンサ電圧を零電圧から所定の電圧に増

加させる必要がある。一般に外部充電回路を使用することで上記目的を実現できるが、高コスト化と重量増大を引き起こすという問題がある。そこで、本研究では変換器に使用する半導体パワーデバイスの通電率を適切に調整することで、外部充電回路を用いることなく初期充電の実現を試みる。また、電流を適切に制御することで、変換器の主パワーデバイスにおいて電流零でスイッチングが実現可能な零電流スイッチング（ZCS: Zero Current Switching）を実現できることを示す。制御系と始動法の検証は、「PSCAD/EMTDC」を用いたコンピュータシミュレーションにより行う。

次に、ミニモデルによる実験検証、即ち本研究で提案する非絶縁型直流-直流変換器に関して級ミニモデルを用いた実験検証を行う。ミニモデル主回路に関しては、以前より類似の変換器を多数製作実績のある会社に回路部品を作成して頂き、それを複数組み合わせることで構築した。定常特性、始動特性、指令値急変時・電源急変時の過渡特性の実験検証を行い、本回路の有効性・制御法の妥当性を明らかにした。図3にミニモデルから得られた実験結果を示す。左図は高圧側から低圧側に電力伝送した場合を、右図は低圧側から高圧側に電力伝送した場合の波形を示す。主変換器で共に零電流スイッチングが実現できており、当初の目的を達成できている。

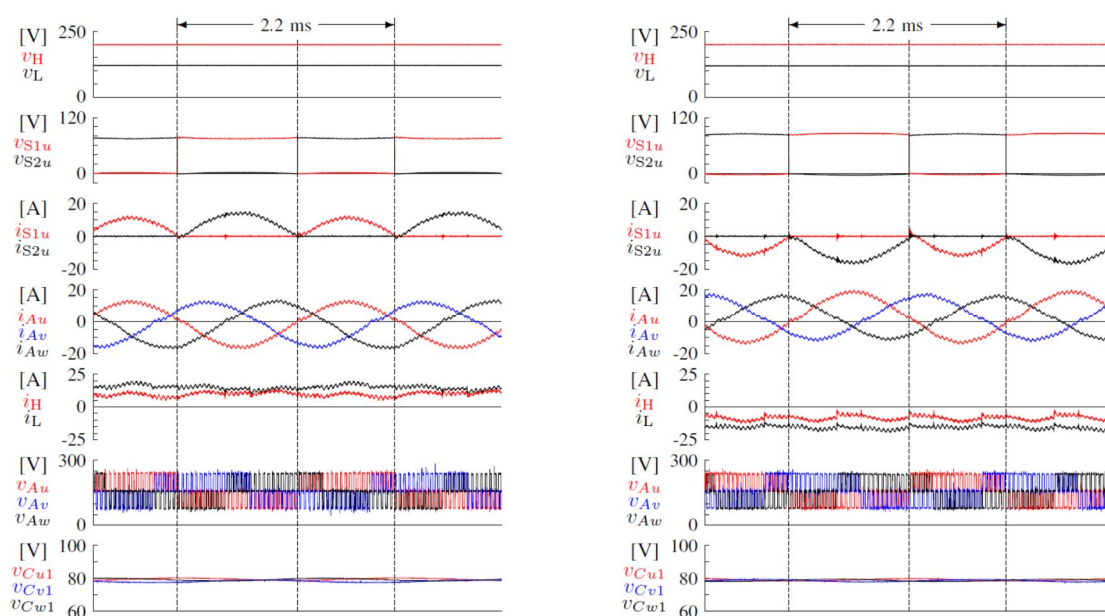


図3 ミニモデルより得られた定常実験波形

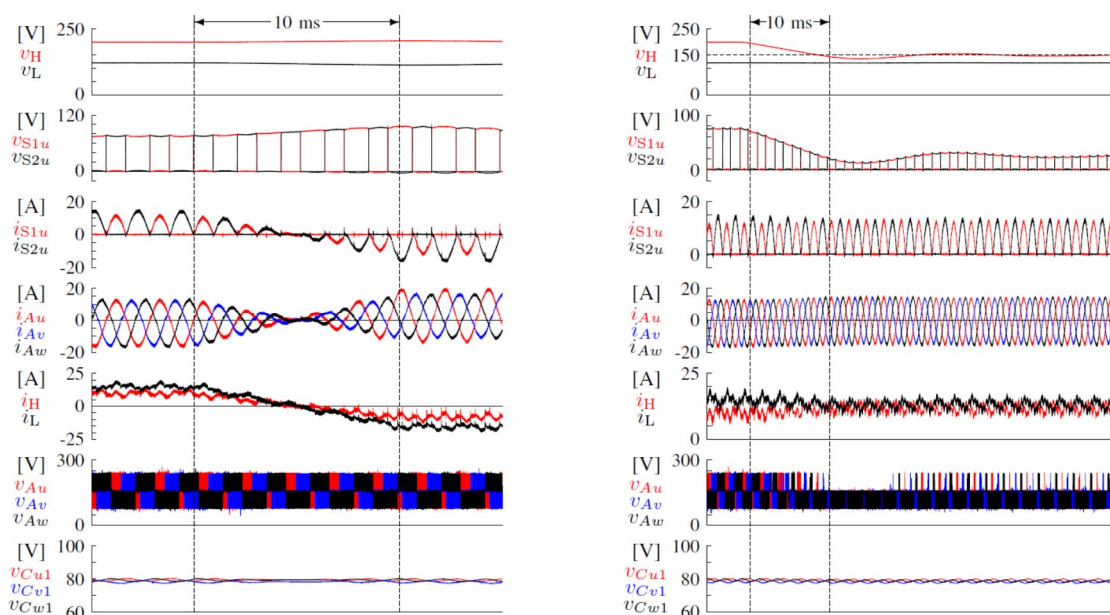


図4 ミニモデルより得られた過渡実験波形

2020年度は、主に過渡特性に関して検討を行った。図4に、ミニモデルより得られた過渡実験波形を示す。左図は電力指令値を急変させた場合を、右図は直流電圧を急変させた場合の実験波形を示す。波形より、良好な過渡特性を実現できることを確認した。得られた実験結果は電気

学会産業応用部門誌と、当研究分野のトップジャーナルである IEEE Transactions on Power Electronics に掲載された。

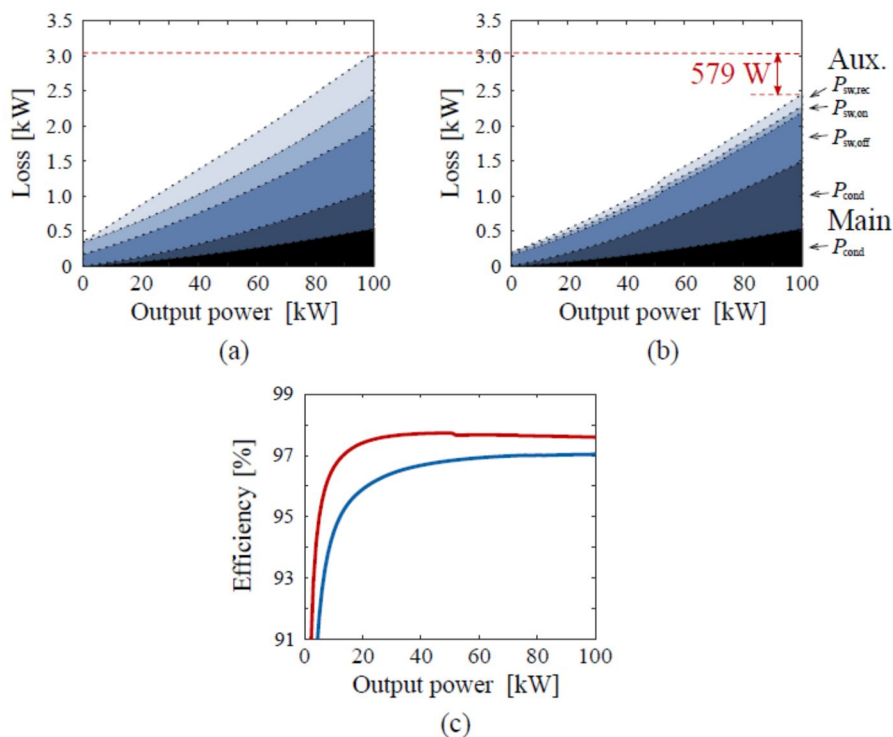


図5 効率比較

2021年度は、検討する非絶縁型直流-直流変換器の高効率化と高電力密度化の両立を試み、シミュレーション、理論解析、実験の三通りにより検討を行った。具体的には、前年度まで補助変換器に適用するセルは同一周波数、同一構成であったが、異なるセルを適用し、同時に周波数を個別に設定することで、高効率化と高電力化の両立を試みた。初めに、各セルのコンデンサ電圧を個別に制御した場合に適した制御法を確立した。具体的には、新回路方式に適した制御ブロック線図を新たに考案した。考案した制御法の有効性妥当性はミニモデルを用いた実験検証により確認した。得られた実験結果は、当該研究分野で最も権威のある国際会議である ECCE(Energy Conversion Congress and Expo)2021にて発表した。

次に、MATLABを用いた数値解析によりコンデンサ電圧とスイッチング周波数が変換器効率に及ぼす影響を解析し、高効率と高電力密度を同時に実現するための指針を示した。その結果、前年度までに検討した回路と比較し、最大効率が1%程度向上することを明らかにした。また、提案変換器の電力密度とセル数の評価に関してパレートフロントカーブを用いた評価を行うことで、最適動作周波数、最適セル数の関係に関して明らかにした。解析の妥当性はミニモデルを用いた実験により明らかにした。得られた結果は、当該研究分野で日本において最も権威のある学術論文誌である電気学会産業応用部門誌に掲載された。

また、電流制御法の最適化に関する昨年度に引き続き検討を行った。具体的には、正弦波法、三次高調波重畳法、台形波法の三種類に関してミニモデルによる実験検証と、MATLABを用いた数値解析の両面から検討を行った。その結果、各方式の得失に関する新たな知見を得た。得られた研究成果は、著名な国際会議である IFEEC2021で発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 手崎和明、萩原誠	4. 巻 141
2. 論文標題 3レベルフライングキャパシタ変換器をベースとした双方向非絶縁形DC-DC変換器の効率・電力密度評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会産業応用部門誌	6. 最初と最後の頁 718-728
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.141.718	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 -
1. 著者名 手崎和明、萩原誠	4. 巻 36
2. 論文標題 Control and Experimental Verification of a Bidirectional Nonisolated DC-DC Converter Based on Switched-Capacitor Converters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power Electronics	6. 最初と最後の頁 6501-6512
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPEL.2020.3040070	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 -
1. 著者名 手崎和明、石田侑次、萩原誠	4. 巻 10
2. 論文標題 Control and Experimental Verification of a Bidirectional Non-isolated DC-DC Converter Based on Three-level Flying-Capacitor Converters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 114-123
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.19011914	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 -
1. 著者名 手崎和明、石田侑次、萩原誠	4. 巻 140
2. 論文標題 3レベルフライングキャパシタ変換器をベースとした双方向非絶縁形DC-DCコンバータの制御法と実験検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会産業応用部門誌	6. 最初と最後の頁 458-467
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.140.458	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10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 絹谷和馬、手崎和明、萩原誠、田口義晃
2. 発表標題 Application of Trapezoidal-wave Current Control Method to DC-DC Converter Based on Flying-capacitor Converter
3. 学会等名 2021 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 手崎和明、萩原誠
2. 発表標題 High-efficiency Operation of a Bidirectional Non-isolated DC-DC Converter Based on Flying-capacitor Converters
3. 学会等名 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 手崎和明、萩原誠
2. 発表標題 Efficiency and Power Density Evaluations of Bidirectional Non-isolated DC-DC converter Based on Flying-capacitor Converters
3. 学会等名 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 手崎和明、萩原誠
2. 発表標題 A Bidirectional Non-isolated DC-DC Converter Based on Switched-Capacitor Converters for DC Electric Railways
3. 学会等名 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 手崎和明、萩原誠
2. 発表標題 フライングキャパシタ変換器をベースとした双方向非絶縁形DC-DCコンバータの電力密度に関する性能評価
3. 学会等名 2021 年電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 絹谷和馬、手崎和明、萩原 誠、田口義晃
2. 発表標題 FCCをベースとした双方向非絶縁形DC-DC変換器:台形波電流制御の実験検証
3. 学会等名 2021 年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 手崎和明、萩原誠
2. 発表標題 スイッチトキャパシタ変換器をベースとした双方向非絶縁形DC-DCコンバータの電流リップル解析
3. 学会等名 2020年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 手崎和明、萩原誠
2. 発表標題 スイッチトキャパシタ変換器をベースとした双方向非絶縁形DC-DCコンバータ:実験とシミュレーションによる動作検証
3. 学会等名 2020 年電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石田侑次、手崎和明、萩原誠
2. 発表標題 3レベルフライングキャパシタ変換器をベースとした双方向非絶縁形DC-DCコンバータの制御法と実験検証
3. 学会等名 2020 年電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 手崎和明、萩原誠
2. 発表標題 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タ数に関する検討
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

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 チョッパ回路	発明者 萩原誠、田口義晃、 福田典子	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-202226	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 チョッパ回路	発明者 萩原誠	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-199400	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	佐野 憲一郎 (Sano Kenichiro) (60589307)	東京工業大学・工学院・助教 (12608)	

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
---------	---------