

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	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コンバータの制御法と高効率化・高電力密度化に関する研究
Title(English)	Study of Non-isolated Bidirectional DC-DC Converter Based on Switched-Capacitor Converter in terms of Control and Efficiency/Power Density Evaluations
著者(和文)	手崎和明
Author(English)	Kazuaki Tesaki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11749号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:萩原 誠,千葉 明,藤田 英明,竹内 希,清田 恭平,伊東 淳一
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11749号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	手崎 和明		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	萩原 誠	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、「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 コンバータの制御法と高効率化・高電力密度化に関する研究」と題し、蓄電池電車に適用される双方向非絶縁形 DC-DC コンバータに関して、電力変換器の高電力密度化と高効率化を目的とした回路方式と制御法を提案する。提案回路は、4 個のパワーデバイスを接続した「主変換器」と複数台の双方向チョップパセル回路 (以下、チョップパセル) や単相フルブリッジ変換器 (以下、ブリッジセル) をカスケード接続した「補助変換器」から構成される。補助変換器とインダクタを組み合わせたことで制御電流源として動作する点に特長があり、主変換器パワーデバイスの零電流スイッチングを実現できる。その結果、主変換器のスイッチング周波数は従来の 2 レベル変換器と比較して高周波化でき、提案回路は高電力密度化を達成できる。本論文では以下の 6 章で構成されている。

第 1 章「序論」では、我が国における直流電気鉄道の省電力化技術動向と課題について述べるとともに、研究目的を明らかにする。

第 2 章「直流電システム省電力化技術と蓄電池電車の技術動向」では、蓄電池電車が直流電システム省電力化に貢献する立ち位置を明確にしたうえで、蓄電池電車の更なる導入促進に要求される技術動向について論じる。最初に、従来の直流電システムの構成に触れ、回生電力の有効活用時に要求される制約条件について述べる。次に、地上電力設備による省電力化技術や実用化事例の動向を詳述する。その後、蓄電池電車に関して地上電力設備との関連性や相違点に触れながら概説し、蓄電池電車の技術的課題として DC-DC コンバータの高電力密度化が要求されることを言及する。最後に、DC-DC コンバータの更なる高電力密度化のために必要な技術的課題と解決策を整理することで、本論文の位置付けを明確にする。

第 3 章「スイッチトキャパシタ変換器をベースとした回路トポロジー」では、提案回路の特長を説明した後に、主変換器パワーデバイスの零電流スイッチングと直流コンデンサ電圧制御を達成する電流制御法を提案する。これは、インダクタ電流を主変換器周波数成分と直流成分に分離することで、ロバストな電力制御とコンデンサ電圧バランス制御を実現できる。設計・製作した 200-V, 2-kW ミニモデルによる実験検証より、定常時・負荷変動時・電源電圧変動時に関わらず、コンデンサ電圧の安定した制御が可能であるだけでなく、主変換器パワーデバイスの零電流スイッチングが実現できることを確認する。

第 4 章「パレートフロントカーブによる効率-電力密度評価」では、提案回路方式の変換器効率-電力密度特性をパレートフロントカーブによる数値解析から定量的に評価し、提案回路が最も小型・軽量化できる設計指針を明らかにする。これは、主変換器および補助変換器の 2 種類のスイッチング周波数と補助変換器を構成するチョップパセル数といった 3 つの設計自由度を活用する点に特長があり、各設計自由度が変換器の高電力密度と変換器効率に与える影響を定量的に評価している。変換器設計の際に使用する各変数の理論値の有効性を 200 V, 1 kW ミニモデルを用いた実験検証より確認する。さらに、1.85 kV, 100 kW 実スケールモデルに基づいた変換器設計の数値解析より、提案回路の高電力密度化に対する優位性を示す。

第 5 章「階調制御を適用した双方向非絶縁形 DC-DC コンバータの高効率化」では、提案回路の更なる高効率動作を目的として、スイッチング損失が低減可能な新しい補助変換器の回路方式と制御法を提案する。本章の提案回路は、補助変換器に 1 台のチョップパセルと 2 台のブリッジセルを適用し、チョップパセルとブリッジセルが異なる直流コンデンサ電圧で動作する点に特長がある。チョップパセルを主変換器と同一のスイッチング周波数で動作し、ブリッジセルの直流コンデンサ電圧を小さくすることで、スイッチング損失の大幅低減が可能となる。設計・製作した 150 V, 500 W ミニモデルによる実験検証より、提案回路・制御方式の妥当性と有効性を確認する。さらに、数値解析より 1.5 kV, 100 kW 実スケールモデルに基づいた効率比較より、幅広い出力動作範囲において高効率化が達成できることを示す。

第 6 章「結論」では、本論文で得られた成果を要約し、今後の課題について言及している。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： 電気電子 系
Department of Graduate major in 電気電子 コース
学生氏名： 手崎 和明
Student's Name

申請学位(専攻分野)： 博士 (工学)
Academic Degree Requested Doctor of
指導教員(主)： 萩原 誠
Academic Supervisor(main)
指導教員(副)：
Academic Supervisor(sub)

要旨(英文300語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This dissertation discusses a new high-power-density bidirectional non-isolated dc-dc converter intended for electric railway system applications. In recent years, battery energy storage systems have been installed in Japanese dc electric railway systems with nominal dc catenary voltages of 600 V, 750 V, and 1500 V to improve utilization of electric power. It is strongly desired to reduce the mass and volume of the power converter used in battery energy storage systems because it is placed in a moving train car.

This dissertation proposes a bidirectional non-isolated dc-dc converter that is based on switched-capacitor converters. It consists of a main converter with four power devices, an auxiliary converter that is formed by cascaded chopper cells (i.e., bidirectional choppers) or bridge cells (i.e., single-phase full-bridge or H-bridge converters), and a small-sized inductor. The auxiliary converter works as a controlled voltage source, resulting in robust power-flow control and stable voltage regulation of the dc capacitors. All power devices used in the main converter can achieve the zero-current switching (ZCS) under arbitrary load conditions and an arbitrary voltage ratio of high-side voltage to low-side voltage. As a result, the proposed converter can increase the switching frequency of the main converter, which will increase the power density.

Moreover, this dissertation discusses a new control method to increase the efficiency of the proposed converter. In this method, the auxiliary converter consists of a chopper cell and two bridge cells. This is based on gradation voltage control and focuses on reducing the switching loss of the auxiliary converter by applying the following techniques: zero-current switching, the reduction of the switching frequency, and the reduction of the capacitor voltage.

Finally, this dissertation evaluates the efficiency and power density of the proposed converters. The relationship between the carrier frequencies of the main and auxiliary converters, the number of chopper cells, and the efficiency and power density of the converter are analyzed quantitatively based on the Pareto optimization method. The efficiency and power density of an actual dc-dc converter system rated at 100 kW are evaluated through numerical analyses using the "MATLAB" software package.

The validity of the operating principles and the control methods proposed in this dissertation are verified through computer simulations and experiments on downscaled models.

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).