

	おくたに しょうた
氏 名	奥谷 将太
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博甲第 1083 号
学 位 授 与 の 日 付	令和 5 年 3 月 24 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 電子システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	Isolated Bidirectional Filter-Embedded DC-DC Converters with Ripple-Canceling Characteristics for High-Power High-Voltage Applications (リップルキャンセル機能を有した絶縁型双方向フィルタ内蔵型 DC-DC 大電力高電圧変換器に関する研究)
審 査 委 員	(主査)特定教授 門 勇一 教授 吉本 昌広 教授 小林 和淑 准教授 廣木 彰 東京都立大学教授 和田 圭二

論文内容の要旨

カーボンニュートラル社会を実現する分散型電力網の構築に向けて、半導体電力変換器 (Solid-State Transformer: SST) の社会実装が期待されており、本学位論文は SST における主要構成部である絶縁型双方向 DC-DC 変換器の電流リップル抑制と高耐圧化等について論じている。電流リップル低減に対して電圧形リップルキャンセル (Ripple-Cancel: RC) 方式、高耐圧化に対してスイッチトキャパシタ (Switched Capacitor: SC) 方式が有力であることを明らかにして、3 つの新規回路による課題解決を検討している。

第 3 章では、双方向絶縁型フィルタ搭載 RC 変換器を提案し、従来回路の優れた特徴を継承しつつ、外付けフィルタ付随の従来回路との包括的な比較実験の結果、従来回路に比べ電力密度とリップル低減において優れていることを実証した。第 4 章では、自動電圧バランス特性や拡張性を有するラダー型 SC 回路を用いた双方向絶縁型フィルタ搭載ハイブリッドマルチレベル RC 変換器を提案している。実験により自動電圧バランス特性、突入電流抑制、及び入出力電流リップル共に整流電流振幅の約 1/7 まで低減することを実証し、解析や設計論の妥当性を証明している。第 5 章では RC 回路とディクソン型共振 SC 回路を統合した双方向絶縁型フィルタ搭載ハイブリッドマルチレベルディクソン RC 変換器を提案している。設計論に基づいた回路試作により、突入電流抑制、入力電流リップルを整流電流振幅の約 1/50 まで低減することを実証し、大容量キャパシタや追加のインダクタを必要としない RC 回路の高耐圧化の実現を実験的に示した。

以上の新規回路により、従来の絶縁型双方向 DC-DC 変換器が有する電流リップル抑制と高耐圧化の課題を解決し、SST の耐圧を 1.5 倍、電力密度を 1.4 倍改善し、電流リップル抑制度合いに応じた電解コンデンサの寿命延伸に貢献すると第 6 章で結論している。

論文審査の結果の要旨

カーボンニュートラル社会を実現する分散型電力網の構築に向けて、半導体電力変換器 (Solid-State Transformer: SST) の必要性が高まっており、本学位論文は SST における主要構成部である絶縁型双方向 DC-DC 変換器の電流リップル抑制と高耐圧化等について論じている。

第 2 章では、電流リップル低減策と高耐圧化に対する従来技術の比較や到達点と課題を明らかにし、前者に対して電圧形リップルキャンセル (Ripple-Cancel: RC) 方式、後者に対してスイッチトキャパシタ (Switched Capacitor: SC) 方式が有力であることを明らかにした。この結果を踏まえ、本学位論文では 3 つの新規回路を提案し、課題解決を図っている。

第 3 章では、双方向絶縁型フィルタ搭載 RC 変換器を提案し、従来回路のソフトスイッチング特性、高周波駆動、高効率などの優れた特徴を継承しつつ、外付けフィルタ付随の従来回路との包括的な比較実験の結果、従来回路に比べ電力密度とリップル低減において優れていることを実証した。

第 4 章では、RC 回路を高耐圧化するため、自動電圧バランス特性や拡張性を有するラダー型 SC 回路を用いた双方向絶縁型フィルタ搭載ハイブリッドマルチレベル RC 変換器を提案している。提案回路の動作解析を行い、SC 回路の問題である突入電流を防ぐ設計パラメータを明らかにして設計論を構築した。実験により自動電圧バランス特性や、突入電流抑制、入出力電流リップル共に整流電流の振幅の約 1/7 まで低減することを実証し、解析や設計論の妥当性を証明した。

第 5 章では、ラダー型 SC 回路の課題であるレベル拡張時の大容量キャパシタやインダクタの増加を解決するため、RC 回路とディクソン型共振 SC 回路を統合した双方向絶縁型フィルタ搭載ハイブリッドマルチレベルディクソン RC 変換器を提案している。提案回路の電荷移動解析により突入電流抑制動作の条件とその限界を解明し、不完全突入電流抑制動作の受動補償方策を提案し、回路設計指針を明らかにした。設計指針に基づいた回路試作により、突入電流抑制、入力電流リップルを整流電流振幅の約 1/50 まで低減することを実証し、大容量キャパシタや追加のインダクタを必要としない RC 回路の高耐圧化の実現を実験的に示した。

以上の新規回路により、従来の絶縁型双方向 DC-DC 変換器が有する電流リップル抑制と高耐圧化の課題を解決し、SST の耐圧を 1.5 倍、電力密度を 1.4 倍改善し、電流リップル抑制度合いに応じた電解コンデンサの寿命延伸に貢献すると第 6 章でまとめている。

本論文は上記の通り、フィルタ機能を電力インダクタに統合する電力変換器設計論の確立、及び、SC 回路を大電力用途に応用するための電力変換器設計論の確立により、SST の高性能化に貢献する学術的意義を有しており、高く評価できる。

本論文は申請者を筆頭著者とする査読を経た以下の 3 編の原著論文を基礎としている。

- S. Okutani, P. -Y. Huang, R. Nishiyama, and Y. Kado, “Analysis and Comparison of Series Resonant Converter With Embedded Filters for High Power Density DCX of Solid-State Transformer,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 7716–7733, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142028.
- S. Okutani, P. -Y. Huang, J. Sugimoto, R. Nishiyama, and Y. Kado, “Bidirectional Isolated Hybrid Ripple-Cancel Dual Active Bridge Converter with Automatic Voltage Sharing for High Voltage Application,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, 2023, vol. 12, no. 1, pp. 33–44, doi:

10.1541/ieejjia.22002631.

- **S. Okutani**, R. Nishiyama, P. -Y. Huang, and Y. Kado, “Multilevel Switched Capacitor LLC-DCX Converter With Embedded Filter,” *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 4, pp. 34–51, 2023, doi: 10.1109/OJPEL.2023.3235195.