

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14235

研究課題名（和文）インダイレクト型ハイブリッド回路の同期整流式絶縁型DC-DCコンバータへの応用

研究課題名（英文）Application of Dual-Path Hybrid Topology to Synchronous Rectifier in Isolated DC-DC Converter

研究代表者

畑 勝裕 (Hata, Katsuhiko)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：70837294

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、インダイレクト型ハイブリッド回路を絶縁型DC-DCコンバータの二次側同期整流回路に応用することで、出力インダクタにおける損失を大幅に低減し、電源回路全体の小型・高効率化を実現するための理論構築と実機実証に取り組んだ。特に、1. 定常特性の理論解析とモデル化、2. 小型・高効率化を実現するための素子選定と回路設計、3. 負荷変動等を考慮したソフトスイッチング成立条件の明確化、の3つのテーマを実施し、これらの成果を統合することでインダイレクト型ハイブリッド回路を採用した同期整流式絶縁型DC-DCコンバータの設計理論を構築し、その有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、インダイレクト型ハイブリッド回路を絶縁型DC-DCコンバータの二次側同期整流回路に応用するための具体的な回路構成を示し、理論解析に基づく素子選定と回路設計に関する手法を体系的にまとめた。また、インダイレクト型ハイブリッド回路の課題であったキャパシタのスパイク電流を抑制できる新たな回路トポロジーを提案し、その有効性を実証実験により明らかにしたことで、提案回路を幅広いアプリケーションに適用できる可能性を示した。このほか、実証実験を通じて実際の応用を視野に入れた知見が得られ、高性能電源回路の発展につながる成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on developing a theoretical framework and practical demonstration of applying a dual-path hybrid topology to the secondary-side synchronous rectifier in an isolated DC-DC converter. The aim is to significantly reduce losses in the output inductor, thereby achieving a more compact and efficient power supply circuit. Specifically, the research addressed three key topics: 1) theoretical analysis and modeling of steady-state characteristics, 2) component selection and circuit design to achieve small size and high efficiency, and 3) clarification of soft switching conditions considering load variations. By integrating the outcomes, the study established a theoretical framework for a synchronous rectified isolated DC-DC converter incorporating a dual-path hybrid topology and demonstrated its effectiveness.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：DC-DCコンバータ ハイブリッドDC-DCコンバータ 電源回路 インダクタ電流低減 ソフトスイッチング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、電子機器の高速化・高機能化を実現するために集積回路(IC)の微細化・高集積化が進むとともに、更なる低消費電力化を図るために IC 内部の低電圧化のトレンドが続いている。さらに、機能拡大に伴う消費電力の増加は大電流化を招き、昨今の電源システムは負荷の低電圧・大電流化に対応しなければならない。

ここで、電源回路の入力電圧が高く降圧比が大きい場合、回路動作の高周波化による受動部品の小型化はパワー半導体素子のスイッチング損失増大を招き、電源回路の小型化と高効率化はトレードオフの関係にある。このトレードオフを打破するため、スイッチト・キャパシタ(SC)回路とチョップ回路を組み合わせたハイブリッド回路が提案されており、電源回路分野における一つのトレンドになっている。しかし、低電圧・大電流出力の電源回路では、スイッチング損失よりもインダクタの導通損失が支配的な損失要因になる場合があり、特に、インダクタが出力に直結される「ダイレクト型」の回路トポロジーでは、負荷電流がすべて出力インダクタを通過するため、大電流出力時のインダクタ導通損失が課題となっている。

そこで、研究代表者は、インダクタの接続方法を工夫した「インダイレクト型」のハイブリッド回路を提案し、インダクタに流れる電流を低減することで、大電流出力時の大幅な損失低減、すなわち、電源回路の高効率化を実現できることを明らかにした。しかし、これまで非絶縁型 DC-DC コンバータを対象とした検討しか行っておらず、適用できるアプリケーションが限定的であった。そのため、絶縁が必要なアプリケーションも考慮し、インダイレクト型ハイブリッド回路の絶縁型 DC-DC コンバータへの適用可否を検討することにした。

### 2. 研究の目的

本研究では、非絶縁型 DC-DC コンバータを対象としたインダイレクト型ハイブリッド回路をベースに検討を行い、絶縁型 DC-DC コンバータを対象とした新たな回路トポロジーを提案し、その有効性を実証実験により明らかにする。この際、非絶縁型と絶縁型の違いに着目しながら、提案回路の小型・高効率化を実現するための設計理論を構築し、損失要因の明確化と回路定数の最適化を検討する。また、得られた研究成果を体系的にまとめ、インダイレクト型ハイブリッド回路が絶縁型 DC-DC コンバータに適用できることを明らかにし、提案回路の更なる利用拡大を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、具体的なインダイレクト型ハイブリッド回路に着目しながら、理論解析に基づいて小型・高効率化を実現するための回路設計手法を体系的にまとめ、インダイレクト型ハイブリッド回路を絶縁型 DC-DC コンバータに応用するための設計理論を構築する。特に、本研究では①定常特性の理論解析とモデル化、②小型・高効率化を実現するための素子選定と回路設計、③負荷変動等を考慮したソフトスイッチング成立条件の明確化、の3つのテーマを実施し、これらの成果を統合することでインダイレクト型ハイブリッド回路を採用した絶縁型 DC-DC コンバータに関する基盤技術を確立する。

### 4. 研究成果

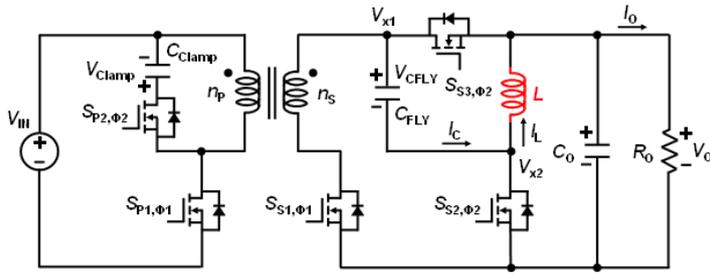
#### (1) インダイレクト型ハイブリッド回路を適用した絶縁型 DC-DC コンバータの実機実証

絶縁型 DC-DC コンバータの一種である、アクティブクランプフォワードコンバータの二次側同期整流回路としてインダイレクト型ハイブリッド回路を採用した新しい回路トポロジー(図1)を提案した。提案回路は、非絶縁型 DC-DC コンバータにインダイレクト型ハイブリッド回路を適用した際と同様に、インダクタ電流を低減でき、さらに、インダクタ導通損失を低減することで高効率化に寄与することを明らかにした。また、試作機を用いた実証実験によって提案回路の有効性を示した。

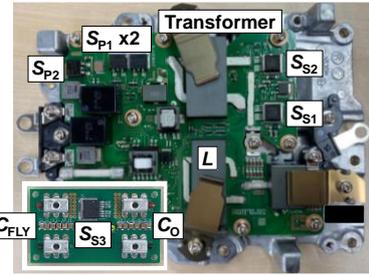
#### (2) 回路解析に基づく理論構築と絶縁型 DC-DC コンバータ特有の課題抽出

図1の提案回路における2つの回路状態に基づいて、デューティ比等に対する動作点を求める手法を確立し、定常特性の理論解析とモデル化に基づいて素子選定および回路設計に必要な情報を整理した。さらに、トランス巻き数比と降圧比の関係より、トランス巻き数比を削減した回路設計によって小型・高効率化を実現できる可能性を示した。このほか、トランス励磁電流を利用した一次側回路のソフトスイッチング可否を検討し、小型・高効率化につながる回路設計・制御手法を検討した。

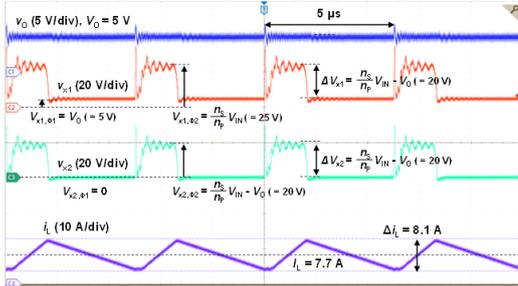
また、非絶縁型 DC-DC コンバータでは存在しなかったトランス巻き数比やトランス励磁電流などの影響により、各回路動作における転流過程を詳細に解析する必要性を確認し、インダイレクト型ハイブリッド回路を絶縁型 DC-DC コンバータに適用する場合、非絶縁型に比べて素子選定と回路設計がより複雑になることが分かった。



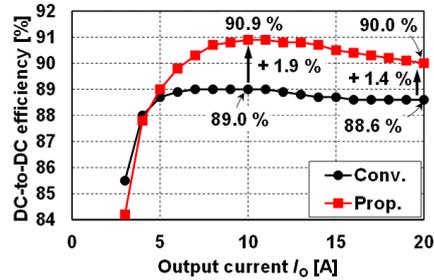
(a) 提案回路



(b) 試作機

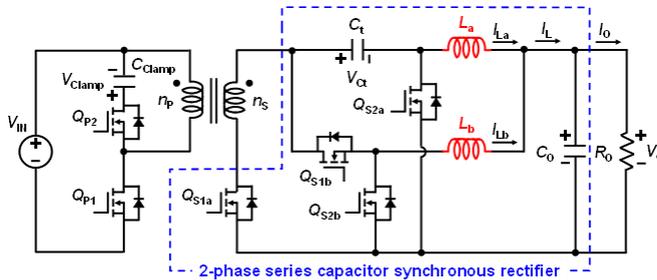


(c) 実測波形

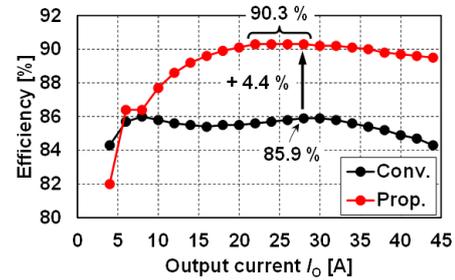


(d) 実測効率

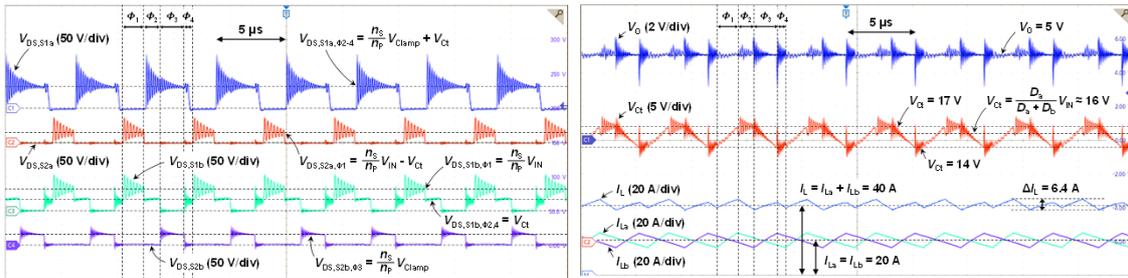
図1 提案のデュアルパスハイブリッド同期整流回路を用いたアクティブクランプフォワードコンバータ



(a) 提案回路



(b) 実測効率



(c) 実測波形

図2 提案のキャパシタ分圧方式2相同期整流回路を用いたアクティブクランプフォワードコンバータ

### (3) キャパシタのスパイク電流を抑制する新たな回路トポロジー提案

インダイレクト型ハイブリッド回路の課題であったキャパシタのスパイク電流を抑制できる新たな回路トポロジー (図2) を提案し、その有効性を実証実験により明らかにした。このとき、主な回路状態は2つから4つに増加したが、同様な解析手法によって動作点が求められることを示した。しかし、トランス励磁電流が回路動作に強い影響を与えることが明らかになったため、トランス励磁電流の転流動作を考慮した回路状態の細分化および詳細な回路解析を行い、各電圧電流の振る舞いを考察した結果、適切な補償動作を加えることで所望の動作を実現できる可能性を確認した。

今後の展望として、電流不連続モードを含む多様な条件における転流動作の詳細な解析やデッドタイム等の詳細なパラメータ最適化、出力電圧レギュレーションやインダクタ電流バランスといった詳細な制御手法の検討などに取り組むことで、より実用的な電源回路の技術体系化が望まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 畑勝裕, 鈴木定典, 渡辺健一, 永吉謙一, 高宮真
2. 発表標題 キャパシタ分圧方式2相同期整流回路を用いた車載向けアクティブクランプフォワードコンバータ
3. 学会等名 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 2023年

1. 発表者名 K. Hata, S. Suzuki, K. Watanabe, K. Nagayoshi, M. Takamiya
2. 発表標題 2-Phase Series Capacitor Synchronous Rectifier in Active Clamp Forward Converter
3. 学会等名 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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