

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14710

研究課題名（和文）インダイレクト型ハイブリッドDC-DCコンバータの理論構築と高出力化に向けた研究

研究課題名（英文）Theoretical Construction of Dual-Path Hybrid DC-DC Converter for High Power Output

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、インダクタ電流を低減できるインダイレクト型ハイブリッドDC-DCコンバータに的を絞って、2つの回路状態における各電圧電流の振る舞いを解析し、デューティ比等に対する動作点を求める手法を確立した。また、高出力化および高効率化を実現するために必要な素子選定を可能にする知見を得た。過渡特性については、各素子の内部抵抗を考慮して状態方程式および伝達関数を導出し、制御器設計に利用する手法を検討した。今回実施したデジタル制御ボードを利用したシステム開発および実機検証より、各パワー半導体素子に対するゲート駆動用の電源供給手段および起動/停止シーケンスの確立が不可欠であることが分かった。

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DC-DCコンバータの具体的な回路構成を例として、理論解析に基づく回路設計および制御器設計に関する手法を体系的にまとめ、一般的なインダイレクト型の回路トポロジーに応用できる設計理論を構築した。

今回実施したシステム開発および実機検証より、高出力化および高効率化を実現するために必要な素子選定、理論解析に基づく回路設計および制御器設計、各パワー半導体素子に対するゲート駆動用の電源供給手段および起動/停止シーケンスの必要性など、実際のアプリケーションへ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 research focused on dual-path hybrid DC-DC converters that can reduce the inductor DC current and showed a method to find the operating point based on the duty cycle etc. by analyzing the behavior of each voltage and current in the two circuit states. In addition, the selection of elements necessary to achieve high power output and high efficiency was examined. For the transient characteristics, a method used for controller design based on the state equation and transfer function considering the internal resistance of each circuit element was studied. The system development and experimental verification using the digital control board carried out in this study showed that the power supply for gate driving each power device and start / stop sequence are important.

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 大電流出力 インダクタ電流低減

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (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 IC 回路の微細化・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 回路の低電圧化のトレンドが続いている。また、IC 回路の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。

電源回路である非絶縁型 DC-DC コンバータの基本回路はチョップ回路であり、降圧動作では Buck コンバータがよく使われる。部品点数が少なく、シンプルな回路構成であるため、比較的に利用しやすいが、動作範囲によっては小型化と高効率化を両立することが難しい。特に、バスコンバータのように入力電圧が高く、ある程度出力が大きい場合、電源動作の高周波化によって受動部品の小型化を試みると、パワー半導体素子のスイッチング損失が増大して効率が低下する。そのため、大きさと効率のトレードオフを考慮した回路設計が重要とされてきた。

近年では、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によって、従来のトレードオフを打破するアプローチが示された。このとき、パワー半導体素子にかかる電圧を下げることで、従来回路よりスイッチング損失を低減でき、同サイズであれば高効率化、同じ効率であれば小型化を実現できるが、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り得る。

そこで、本研究ではハイブリッド回路におけるインダクタの接続方法を工夫し、インダクタ電流を低減できるインダイレクト型の回路トポロジーに着目して検討を進めた。インダイレクト型ハイブリッド回路の有用性はすでに示されていたが、最適な動作周波数や回路定数の設計手法など、理論的な解析はまだ不十分であり、更なる検討が必要であった。また、インダイレクト型ではインダクタ電流を低減した分だけフライングキャパシタから負荷電流を供給する必要があるため、キャパシタの充放電損失や瞬時的な電流変化の抑制など、高出力化に向けた更なる検討も必要であった。そのため、これらを考慮した理論的な設計指針を明らかにすることで、新たな電源技術の確立に貢献できると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、インダイレクト型ハイブリッド回路における損失要因の明確化や回路定数の最適化などに取り組んだ。特に、電源回路における損失要因は主にパワー半導体素子とインダクタ(あるいはトランス)の損失であるが、回路トポロジーとインダクタの接続方法を工夫することで大幅な損失低減を可能にする画期的な DC-DC コンバータを開発した。このインダイレクト型ハイブリッド回路は提案されてから間もなく、理論的な解析手法や回路設計などに関する検討は個別トポロジー毎に実施されているのが現状であったため、本研究では具体的な回路トポロジーを扱いながらも、一般的なインダイレクト型ハイブリッド回路に応用できる設計理論を構築し、さらに高出力化に向けた研究開発に取り組んだ。

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、理論解析に基づく回路設計および制御器設計に関する手法を体系的にまとめ、一般的なインダイレクト型回路トポロジーに応用できる理論を構築した。特に、本研究では①定常特性の理論解析と高出力化、②過渡特性の理論解析と制御器設計、③制御機構を含めた包括的な実機検証、の3つのテーマを実施し、各成果を通して当該分野における理論の体系化を行った。また、得られた成果に基づいて小型・高効率かつ高出力を実現する新しい電源回路の基盤技術の確立を目指した。

4. 研究成果

(1) 回路解析に基づく設計理論の構築

2つの回路状態で動作するインダイレクト型のハイブリッド DC-DC コンバータに的を絞り、これらの動作モードにおける各電圧電流の振る舞いを回路方程式およびインダクタ/キャパシタの定常特性より解析し、デューティ比等に対する動作点を求める手法を確立した。また、高出力化および高効率化を実現するために必要な素子選定を可能にする知見を得た。過渡特性については、各素子の内部抵抗を考慮して状態方程式および伝達関数を導出し、制御器設計に利用する手法を検討した。

さらに、高出力化に対応するため、出力電圧リップルの増大を抑えつつ、2つの回路状態の両方でインダクタ電流を低減できる常時デュアルパスハイブリッド (Always-Dual-Path Hybrid : ADPH) DC-DC コンバータを世界で初めて提案した(図1)。本提案回路では、2つの回路状態において、いずれもインダクタとフライングキャパシタの両方から電流供給が行われるため、インダクタ電流の低減効果が大きく、さらに、2つの回路状態間における電流アンバランスが生じにくい回路動作を実現しており、出力コンデンサの容量削減等を検討できる回路トポロジーであることを見出した。今後は高出力密度化に向けた素子選定やパラメータ最適化を行うことで、更なる高性能化を実現できると考えられる。

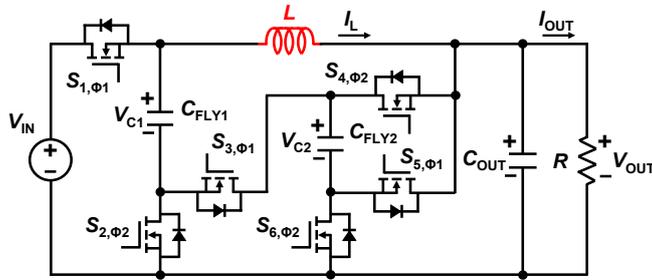


図1 常時デュアルパスハイブリッドDC-DCコンバータの回路構成例

(2) 損失要因の明確化と回路設計への応用

回路解析による各電圧電流の振る舞いを導出し、さらに各パワー半導体素子およびインダクタにかかる電圧および流れる電流よりインダイレクト型ハイブリッド回路の損失要因を明確化する手法を確立した(図3, 図4)。これにより、回路トポロジー毎に高効率化を実現できる設計条件を明らかにし、アプリケーションの仕様に応じた回路トポロジーの選択および素子選定につながる重要な成果が得られた。

本研究では、インダクタの導通損失、パワー半導体素子の導通損失およびスイッチング損失のみを考慮して、従来 Buck コンバータとの比較検討を行ったが、今回考慮できなかった損失要因の更なる解析と異なる回路トポロジー間での比較検討を行うことで、より多様なアプリケーションに対応できる設計手法に改良できると考えられる。

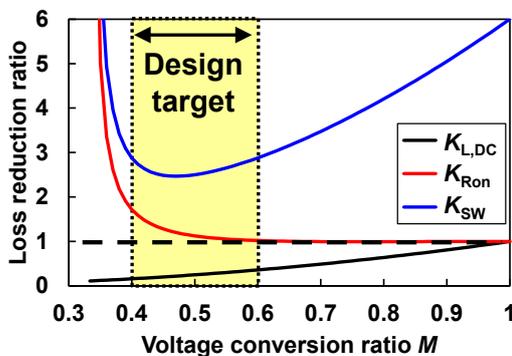


図2 降圧比と各損失低減率

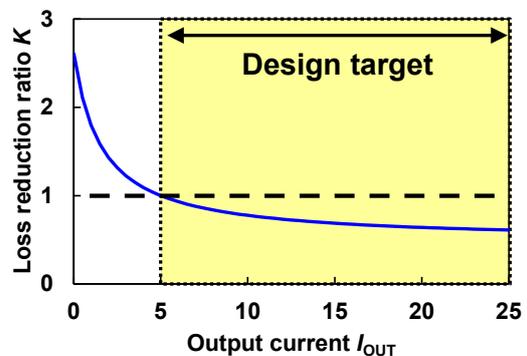


図3 出力電流と損失低減率

(3) 実機検証に基づく応用展開の可能性(今後の展望)

今回実施した理論解析に基づく回路設計および制御器設計の有効性を検証するため、制御機構を含めたシステム開発および実機検証を行った(図4, 図5)。その結果、これらの妥当性が確認できたほか、各パワー半導体素子に対するゲート駆動用の電源供給手段および起動/停止シーケンスの必要性など、実際のアプリケーションへの応用を視野に入れた知見が得られた。これらの成果は今後の高性能電源回路の発展につながると考えられる。

また、本研究では比較的大きなコンデンサ容量を使用して回路設計および実機実証を行い、基本特性の確認ならびに動作検証を優先したため、今後は更なる小型・高効率化を追求していくことになる。本提案回路は、大電流出力用途のアプリケーションに適していると考えられるが、熱設計やノイズ設計まで含めた高度な電源回路設計技術の確立が今後の課題であり、実用化・普及に向けて取り組んでいく必要がある。

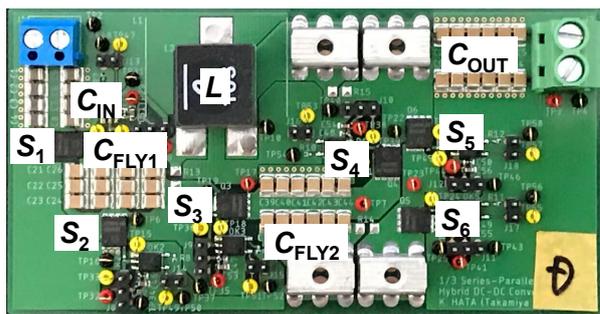


図4 ADPH DC-DCコンバータの試作機

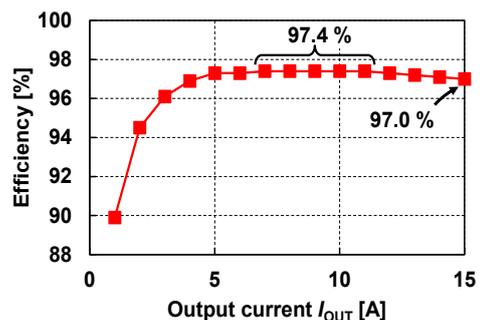


図5 効率特性の実測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 畑 勝裕, 鈴木 定典, 高宮 真 |
| 2. 発表標題 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 |
| 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 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Katsuhiro Hata, Sadanori Suzuki, Makoto Takamiya |
| 2. 発表標題 Dual-Path Hybrid Synchronous Rectifier in Active Clamp Forward Converter for Inductor Current Reduction |
| 3. 学会等名 2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Katsuhiro Hata, Shinsaku Tanaka, Yasuhiro Rikiishi, Takashi Matsumoto |
| 2. 発表標題 48V-to-12V Always-Dual-Path Hybrid DC-DC Converter for Inductor Current Reduction |
| 3. 学会等名 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 畑 勝裕, 江 洋, 羅 文基, 高宮 真 |
| 2. 発表標題 1/2前後の降圧比で高効率な常時デュアルパスハイブリッドDC-DC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 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Katsuhiro Hata, Yang Jiang, Man-Kay Law, Makoto Takamiya |
| 2. 発表標題 Always-Dual-Path Hybrid DC-DC Converter Achieving High Efficiency at Around 2:1 Step-Down Ratio |
| 3. 学会等名 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021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 |
|---------|---------|
| | |