

令和 4 年 6 月 4 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04361

研究課題名（和文）フライングキャパシタを相互に組入れたインターリーブ式ソフトスイッチングコンバータ

研究課題名（英文）Interleaved soft-switching converter with interconnected flying capacitor

研究代表者

安東 至（ANDO, Itaru）

秋田工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：20212665

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、フライングキャパシタを相互に組入れたインターリーブ式ソフトスイッチングコンバータを提案する。研究より、出力電圧に対して使用する半導体SW素子の耐圧を低くする回路構成を構築でき、フライングキャパシタによる昇圧効果を含む良好な電気特性と、すべてのSW素子においてストレスの少ないスイッチングを確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロスレススナバを組み入れたインターリーブ式ソフトスイッチングコンバータは、容量増加とソフトスイッチングを1つのロスレススナバコンデンサを活用して達成できる利点を有する。しかし、種類が少ない半導体SW素子を使用する必要があり、高効率を得るための高電圧出力時にSW素子選定で大きな課題があった。本研究によって、若干の効率低下はあるものの、電気的特性をほとんど損なわずに、従来と同じ耐圧のSW素子で従来の2倍以上の高電圧出力を時間的効率良く行うことができ、課題を克服できた。

研究成果の概要（英文）：This project proposes an interleaved soft-switching converter with interconnected flying capacitor. The proposed converter has a circuit configuration that lowers the withstand voltage of the semiconductor SW devices used in relation to the output voltage. In addition, good electrical characteristics including the boosting effect by the flying capacitor and stress-free switching of all the SW elements were confirmed.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：インターリーブ フライングキャパシタ ソフトスイッチング 昇圧コンバータ 高入力力率

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

マイコンが組み込まれ、デジタル機器を数多く構成部品として用いられている電気機器は、家庭用や産業用を問わず、電源部には商用 AC（交流）電源を DC（直流）電源に変換する AC/DC コンバータが数多く用いられている。これら AC/DC コンバータにおいては、従来はチョークインプット方式整流電圧変換方式を多用していたが、AC 入力電流波形の歪みや電源力率の悪化により、無効電力や高調波電力が発生し、機器の効率悪化や高調波電流が他の機器の障害や故障の原因となることも少なくなかった。近年では、IEC（国際電気標準会議）や JIS 等で定めた高調波電流および電圧規制などが法令化されたことで、多くのコンバータはこれら問題を解決するために PFC（力率改善）機能を備えている。

AC/DC コンバータに PFC 機能を備える手法として、電力用高速半導体スイッチング素子を用いて高効率と正弦波入力電流と高入力力率を同時に得ることが一般的である。これらの主な制御手法には「連続モード制御」と「臨界モード制御」が開発されている。前者は入力電流がゼロになる前に昇圧動作のためのスイッチングを行う手法で、後者は入力電流がゼロになってから次のスイッチング動作を行う不連続スイッチング方式である。

臨界モード制御のデメリットである入力電流高調波を低減させる方法としては「フィルタの大型化」や「スイッチング周波数の上昇」、「並列回路構成によるインターリーブ方式の採用」などがあり、スイッチング周波数を高め、容量の増加も可能な「インターリーブ方式」の採用が利用範囲を広げる上で有効で、多くの応用例が先行研究としても開発されている。

また、高効率を達成するアプローチとして、ソフトスイッチングを積極的に施す手法があり、高効率化手法・低電磁ノイズ制御の一つとしてよく用いられている。さらに、1 kW を超える容量を有する負荷においては、最近が高電圧化による負荷の高効率化を達成する動きも見られる。

2. 研究の目的

本研究では、「フライングキャパシタ(以下、FC と示す。)を相互に組み入れたインターリーブ式ソフトスイッチングコンバータ」を開発し、その能力と制御手法、設計手法をシミュレーションおよび実験結果を通して明らかにする。本研究で開発するコンバータは、インターリーブ構成の特徴を積極的に生かして、FC とリアクトルを相互に組み入れる回路構成とすることで、以下の(1)～(6)を達成可能なコンバータを実現する。通常、FC を用いた昇圧動作は FC への充電と FC を活用した昇圧動作を交互に行うため、充電中は昇圧動作を行えず、逆に放電中は充電動作を行えない。本コンバータの独創性として並列接続の 2 回路の位相をできるだけ 180deg ずらして制御するインターリーブ動作をチャージ&ポンプアップ動作にまで積極的に活用している点にあり、低リップル一定高電圧を供給できるメリットがある。

- (1) 主回路構成上、出力電圧に対して使用する半導体 SW 素子の耐圧を低くすることができる。
- (2) 入力力率 98% 以上、正弦波入力電流、出力電圧変動率 1% 以下を達成する。
- (3) 用いるすべての半導体 SW 素子のソフトスイッチング動作を達成し、インターリーブ接続を活用して効率よく高電圧出力を供給できる。
- (4) 入力電流高調波歪率 THD は 5% 以下を達成する。
- (5) 電源電圧 80V～220V への対応を可能にし、出力電圧は 400V 以上を可能にする。
- (6) 電源電圧変動時にも電圧変動率 1% 以下の安定出力電圧の供給を確認し、供給電力の倍増を確認するとともに FC による昇圧効果を理論面、効率面からも確認する。

3. 研究の方法

開発対象のコンバータは、基本制御回路設計をデジタルシミュレーションにより行い、2に示した(1)～(6)の電気的特性の達成状況を確認の後、実機を試作して実験実証を行う。具体的な研究方法としては以下のように行なった。

2019年度は電子回路によるリアルタイムフィードバックによるデジタルシミュレーションを行い、電気的特性を達成できるか基本制御回路設計を行った。加えて、各スイッチングによる動作モード分けを行い、理論的回路解析も行った。さらに、これら設計をもとに試作機制作にも取り掛かり、入力電圧 50V、出力電圧指令値 200V の簡易実験を行った。

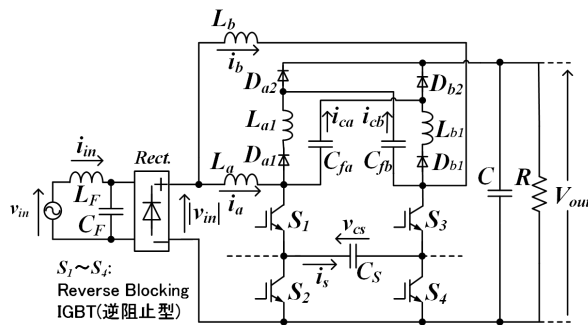
2020年度は2019年度に設計した電子回路によるリアルタイムフィードバック制御回路を基に、100kHzの高速サンプリング周波数によるDSPを用いた完全デジタル制御に移植し、回路動作と基本的電気特性を確認にした。

2021年度は構成した基本制御プログラムをより効率よく駆動できるよう改良した。また、ソフトスイッチングを達成するためのロスレススナバコンデンサによる電圧の立ち上がり遅れ期間をセンサレスで時間効率よく制御調整するため、単安定マルチバイブレータによる16種類の時間選択を可能にしたZVSソフトスイッチング調整回路をハードウェアとして組み込み、シミュレーションと試作機による実験により目標とする電気的特性の達成状況と有効性を確認した。

4. 研究成果

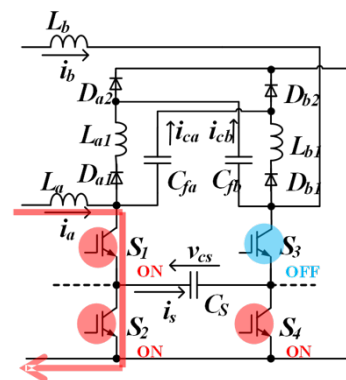
開発するFCを相互に組み入れたインターリーブ式ソフトスイッチングコンバータの主回路を図1に示す。主回路は、昇圧リアクトル・FC・ダイオードの直列接続と、リアクトル短絡用の直列にスイッチSWを2つ接続した回路構成を一組としたFC付き昇圧回路を並列に接続したインターリーブ構成を基本としている。加えて、直列接続したSWの midpoint をロスレススナバコンデンサ C_s を接続する構造になっている。さらに、インターリーブ制御を積極的に活用したFC充電回路として、 L_{a1} と D_{a1} および L_{b1} と D_{b1} の直列要素を介して一方の昇圧リアクトルの電力の一部を並列接続された他方のFCに充電できるクロス結線接続としている。ここで、 S_1, S_2, S_3, S_4 は逆並列還流ダイオードを有しないIGBTを採用している。

本コンバータの制御は、電源電圧と同相の正弦波全波整流波形について、出力電圧の指令値 V_{outref} と実際の値 V_{out} の偏差を比例積分補償器に介した値で振幅変調し、これを昇圧リアクトル電流指令値 i_{ref} とする。本コンバータは、2組あるFC付き昇圧コンバータがゼロ電流スイッチングZCSやゼロ電圧スイッチングZVSのソフトスイッチングを図2の手順に達成しながら昇圧リアクトル電流を i_{ref} に臨界モードで追従制御を行う。なお、図2(a)を説明の基準とする。



Rect.: Fuji 6MBI100-060, $S_1 \sim S_4$: 東芝 IGBT: GT50J121
 $D_{a1} \sim D_{b2}$: サンケン FML36S
 L_F : 0.185mH, C_F : 30μF, L_a, L_b : 0.34mH, L_{a1}, L_{b1} : 0.2mH
 C_s : 0.033μF, C_{fa}, C_{fb} : 3900μF, C : 1500μF

図1 提案するコンバータの主回路構成



(a) 短絡モード

図2 コンバータの回路動作

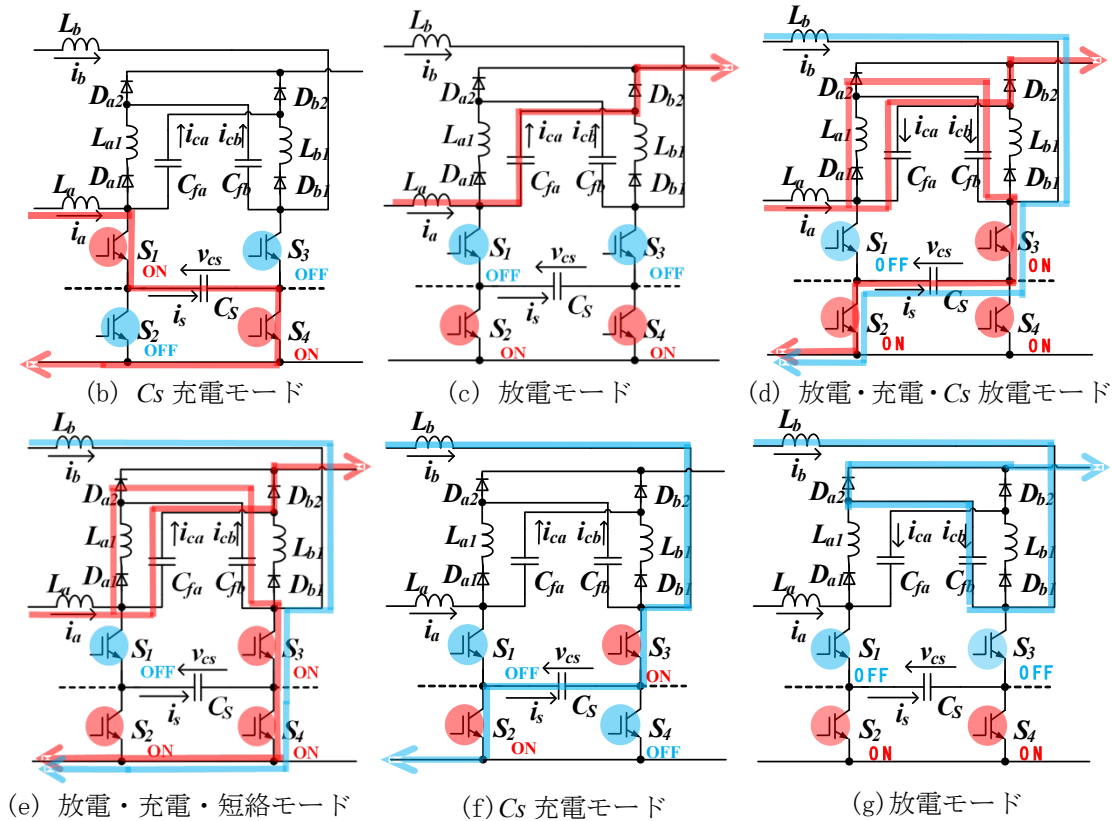


図2 コンバータの回路動作 (つづき)

(a) C_{fa} , C_{fb} は十分に充電されており, i_a , $i_b = 0$ とし, $v_{cs} = 0$ と仮定する。 S_1 , S_2 , S_4 を ON とし, 電源が L_a , S_1 , S_2 を通じて短絡状態にすると, 電流 i_a は L_a により流れ始めが遅れながらも指令値 i_{ref} に到達するまで増加する。

(b) i_a が i_{ref} に到達後 S_2 が OFF となり, i_a は C_s に転流される。 v_{cs} は上昇し, FC の電圧 V_{cfa} と v_{cs} の和が出力側の平滑コンデンサ C の電圧 V_{out} を上回るとダイオード D_{b2} が ON になる。このとき S_2 は C_s により電圧の立ち上がりが遅れるので ZVS が達成される。

(c) C_s の充電電流 $i_s = 0$ で S_1 が OFF となり, C_{fa} の放電が継続される。このときに S_1 に電流は流れず ZCS が達成され, その後, S_2 が ON になり電流は流れていないので ZCS が達成される。

(d) $i_b = 0$ 且つ S_2 が ON で S_3 を ON とする。 S_3 は L_b により電流の流れ始めが遅れ ZCS が達成される。すると L_{ab} , S_3 , C_s , S_2 を通じて C_s が放電され, i_a は D_{a1} , L_{a1} , C_{fb} , S_3 , C_s , S_2 のルートにも分流される。このとき S_3 は L_{a1} と L_b により電流の立ち上がりが遅れるので ZCS が達成される。 $i_s = 0$ になったタイミングで電流経路は S_3 , S_4 に変わる。このとき, 電源は S_3 , S_4 を通じて短絡状態になり i_b が増加する。また, i_a は C_{fa} を通って出力側に流れるものと C_{fb} を充電するものに分流する。

(e), (f), (g) は, インターリーブ接続により (a) 以降と同様である。

本研究ではこれらを TEXAS INSTRUMENTS 社の DSP である TMS320C6657 で完全デジタル制御しており, 100kHz (サンプリング周期: 10 μ s) での各値サンプリングを行なっている。

図2(b)と(f)の期間では, S_2 と S_4 のZVSを実現させるため, (a)で i_a または(e)で i_b の大きさに応じて C_s により電圧の立ち上がりを数 μ s かかるように緩やかにして制御する必要がある。DSP による最小制御間隔は 10 μ s であることから, この動作期間においては DSP からの出力信号は(a)から(c)と(e)から(g)に動作モードを飛び越えて出力し, 図3に示すブロック図のようにハードウェア的に (b)と(f)の動作モードを組み込ませることとした。これより, 直前期間に流れる i_a と i_b の大きさに応じて DSP により (b)と(f)の適切な動作期間が演算・選択され, その後自動的に (c)と(g)の動作に移行する。

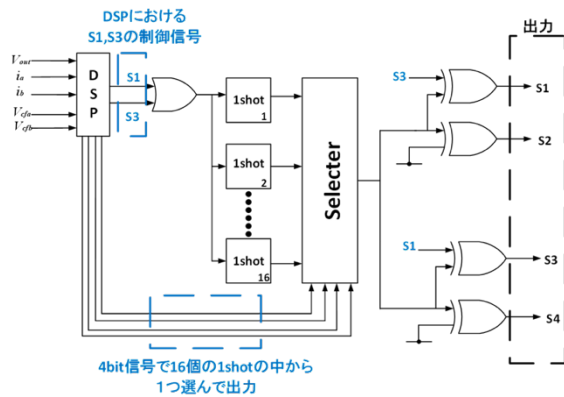


図3 C_5 充電モード期間選択ブロック

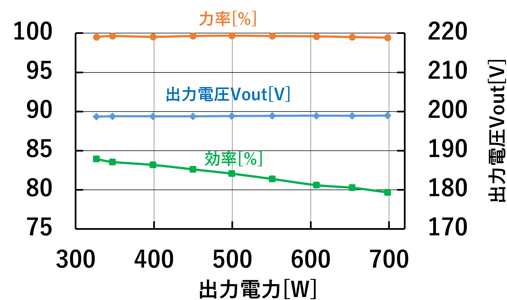


図4 定常基本特性

図4 以降に電源電圧は 50Vrms, 出力電圧 200V, 負荷容量 700W での実験結果を示す。

定常基本特性を図4に示す。ここで、効率測定は入力フィルタ、整流器および開発コンバータを合わせた効率を算出している。出力電圧は変動率1%以下の一定出力電圧特性を達成している。また、入力力率は99%以上の高力率を達成するとともに、入力電流総合歪率 THD は500W 出力において5.2%であった。最新世代の半導体 SW 素子が入手できず、数世代前の SW 素子を使用している実験結果であるが、図4に示す効率は決して高いとは言えず、これは本コンバータの動作に半導体 SW 素子が常に複数個直列に接続されることが損失の要因である。

図5にリアクトル電流波形を示す。正弦波全波整流波形に電流ピーク値が沿い、下段の拡大図より 180deg の位相差による臨界モード制御が確認できる。図6, 図7にはリアクトル電流合成波形と電源電圧電流波形を示す。図6に示すリアクトル電流の合成波形は正弦波状波形となり、入力 LC フィルタにより電源電圧と同相の高力率特性となる正弦波電源電流を達成していることも確認できる。なお、各 SW 素子のソフトスイッチングにおいても、ZVS や ZCS によるソフトスイッチングが実現できていることを確認でき、これら実験結果はシミュレーション結果や回路理論解析とも一致している。

以上の結果より、本研究「FC を相互に組入れたインターリーブ式ソフトスイッチングコンバータ」は、FC を回路内にクロス結線状に相互配置した構成で、チャージ&ポンプアップ動作をインターリーブの特徴である位相差を積極的に活用して時間的効率良く行うコンバータで、その制御方式と特性についてシミュレーションと実験を通じて確認した。使用する電力用半導体スイッチング素子の耐圧を出力電圧の半分程度に低くすること可能であり、種類が少ない逆阻止型ダイオードを持たない IGBT を使用する本コンバータの構成上のデメリットを克服できることが確認できた。また、すべてのスイッチング素子のソフトスイッチングを確認するとともに、入力力率 98%以上の正弦波入力電流で 1%以下の出力電圧変動率を達成するなど、目標とするほぼすべての特性を達成する制御方式が開発でき、目標はほぼ達成できたと思われる。

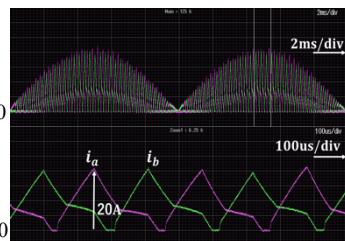


図5 リアクトル電流波形

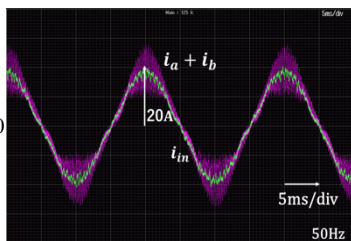


図6 リアクトル電流合成波形と電源電流波形

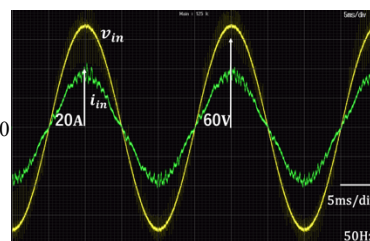


図7 電源電圧と電流波形

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 0件）

1. 発表者名 渡部秀崇, 伊藤健太, 安東至
2. 発表標題 フライングキャパシタを追加したインターリーブ式コンバータの入力電流波形改善
3. 学会等名 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安東至, 岩田理彩, 東海林瑠夏, 大石潔
2. 発表標題 フライングキャパシタを活用したクロス結線式高効率コンバータ
3. 学会等名 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安東至, 東海林瑠夏, 岩田理彩, 大石潔
2. 発表標題 クロス結線式コンバータにおける入力電流波形改善のための理論解析
3. 学会等名 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺田蒔人, 安東至, 矢吹明紀, 上町俊幸, 大石潔
2. 発表標題 スイッチングストップ機能を用いたクロス結線式インターリーブコンバータの入力波形改善
3. 学会等名 高専シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 船木友也, 安東至, 矢吹明紀, 上町俊幸, 大石潔
2. 発表標題 フライングキャパシタを活用したクロス結線式高効率コンバータの実験的検証
3. 学会等名 高専シンポジウム
4. 発表年 2020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
---------	---------