

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 12 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560357

研究課題名(和文)ロスレススナバを組み入れたインターリーブ式高効率AC/DCコンバータの開発

研究課題名(英文) Interleaved AC/DC Converter with Lossless Snubber

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ロスレススナバを組み入れたインターリーブ式完全ソフトスイッチング高効率AC/DCコンバータを提案、開発することである。近年、AC/DCコンバータは電源に高調波電流を流さないよう入力力率100%を高効率で実現する特性が要求されている。提案したAC/DCコンバータはインターリーブ制御により入力電流リップルを改善し、大きな補助共振回路を用いずにすべてのスイッチング素子のソフトスイッチングを達成して高効率を実現することができた。

研究成果の概要(英文)：This project proposes a soft-switching interleaved AC/DC converter with lossless snubber. Recently, AC/DC converters are required unity input power factor characteristic with high efficient operation to prevent the inflow of the harmonic current to the power source. The proposed AC/DC converter improves input current ripple with interleave control. The converter realizes high efficiency by soft-switching operation of all switching devices without large auxiliary resonant circuit.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：AC/DCコンバータ ロスレススナバ インターリーブ ソフトスイッチング 高力率 高効率 PFCコンバータ

1. 研究開始当初の背景

デジタル家電製品の電源部には、商用電源から供給される AC (交流) 電源をデジタル家電製品内部で用いる 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。AC/DC コンバータにおいて、チョークインプット方式整流等が従来より用いられてきたが、AC 入力電流波形が歪んだりして機器の効率悪化や高調波電流により他の機器の障害や故障の原因となることもあった。近年では、IEC や JIS 等で定めた規制が法令化され、多くの AC/DC コンバータは省エネと高調波電流低減を主目的に、高効率を達成すると共に電源に高調波電流を流さないために入力電流正弦波制御および高入力力率制御が施された PFC (Power Factor Correction: 力率改善) 機能を備えている。

これら機能を達成するために、最近の AC/DC コンバータには「連続モード制御」か「臨界モード制御」が用いられることが多い。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、入力電流リップルが小さく、入力フィルタが小型になる利点がある半面、素子のスイッチング損失が高い欠点を有している。一方、後者は入力電流リップルが大きく、入力フィルタが大きくなる半面、スイッチング損失を減少させ効率の高い装置を構成できる利点を有している。

高効率を達成する別の方法として、ソフトスイッチングを積極的に施す手法がある。通常の電力変換器ではスイッチングをする際、スイッチング素子に電流が流れていても、または、電圧がかかっているにもかかわらずオン、オフ動作を行うハードスイッチング方式を行う。しかし、理想的なスイッチング素子と異なり、スイッチング素子の ON や OFF 時間に電圧と電流が共に値を有する時間があり、この電圧と電流の積がスイッチング損失となり、スイッチング周波数が高くなればなるほど装置の効率に影響を与える結果となる。これに対し、ソフトスイッチングはスイッチング素子の「電圧または電流が極めてゼロに近い瞬間」を狙ってスイッチングをするものである。このため、スイッチング損失の極めて少ない動作が行なえ、高効率化を可能にする一つの手法として最近特によく用いられている。これらはコンデンサやリアクトルを用いて電圧や電流の立ち上がりを遅らせることで「電圧または電流が極めてゼロに近い瞬間」を生成し、実現させるのが一般的である。そのため補助共振回路を追加したりする工夫もされているが、部品点数が多くなり、追加補助共振回路内で損失が発生するなど効率を上げきれないところがあった。この点、臨界モード制御は容易にソフトスイッチングを可能にする手法として小容量タイプによく用いられる。

臨界モード制御を用いた AC/DC コンバータ

は入力電流高調波が多く容量増加の点で欠点がある。入力電流高調波を低減する方法としては「フィルタの大型化」や「スイッチング周波数の上昇」、「インターリーブ方式の採用」などがある。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」を採用することは回路の利用範囲を広げる上で有効である。インターリーブ方式は、同様の制御を施した二回路を並列に接続し、スイッチング位相をずらすことで合計して流れる電流の高調波電流を抑える方式であるが、部品点数が増加するなど課題も多いが 2 倍の電力を供給できる利点もある。

以上のことから、AC/DC コンバータにおいては、簡単な方法で実現できるソフトスイッチングを取り入れて高効率を有し、同時にインターリーブ方式による高調波電流の低減を可能にして小型化を実現する AC/DC コンバータ回路の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、図 1 に示すロスレススナバを組み入れたインターリーブ式完全ソフトスイッチング高効率 AC/DC コンバータを提案、開発する。開発するコンバータは、昇圧型 AC/DC コンバータであり、インターリーブ構成による臨界モードコンバータにロスレススナバ回路を組み入れることで、入力電流高調波を低減し、ソフトスイッチングによる効率向上が期待できる。開発する AC/DC コンバータにおいては、以下の項目を達成する制御方式についてシミュレーションを通じて開発すると共に、実機を試作してその有効性、効果を確認する。

- (1) 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。
- (2) 用いるすべての半導体スイッチング素子のソフトスイッチング動作を達成する。
- (3) 効率は一般的な汎用 AC/DC コンバータより 1kW 容量で 3% 以上の向上を達成する。
- (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 への対応を可能にする。
- (6) 電源電圧および負荷変動時にも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。

昇圧型 AC/DC コンバータの開発が終わり次第、開発したソフトスイッチング達成方式および高調波電流低減方式を昇降圧型 DC/DC コンバータと降圧型 DC/DC コンバータにも適用し、シミュレーションや実験を通じてその有効性を確認する。

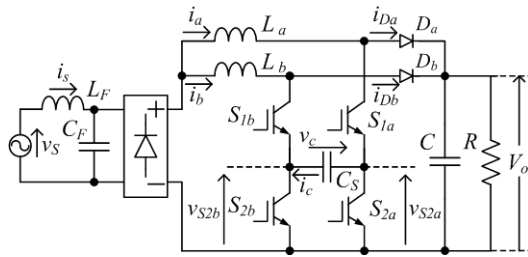


図 1 開発するインターリーブ式高効率 AC/DC コンバータ

3. 研究の方法

主回路は、図 1 に示すようにリアクトル、直列に接続された二つの半導体スイッチング素子、そしてダイオードを一組とした回路が、インターリーブ制御が可能となるように二つ並列に接続された構成であり、半導体スイッチング素子 S_{1a} と S_{2a} の中点と S_{1b} と S_{2b} の中点にスナバコンデンサ C_S が接続され、ロスレススナバを構成している。

(1) 平成 24 年度は、提案する図 1 の回路において、①使用するすべてのスイッチング素子でのソフトスイッチングの達成、②1 kW 負荷時において従来より 3% 程度（軽負荷時はそれ以上）の効率向上、③入力力率 98% 以上、④出力電圧変動率 1% 以下、⑤正弦波入力電流、⑥入力電流総合歪率 5% 以下を達成するための基本制御回路設計をデジタルシミュレーションを通じて、制御安定性を確認しながら行う。なお、上記の⑤と⑥の達成においては、達成のための基本制御回路のみを構築し、2 年目に計画している入力電流波形改善制御の提案回路への組み込みをもって目標特性を達成させる。

本回路は、インターリーブ方式の基本制御手法であり、高調波電流の低減を可能にする「位相をずらしてのスイッチング」を、一つのロスレススナバ C_S による高効率動作に積極的、且つ有効活用することで、すべてのスイッチング素子のソフトスイッチング制御を実現させる。

(2) 平成 25 年度は試作器を完成させ、各制御補償器のゲイン調整を行うとともに、出力電圧一定制御特性および入力特性に関する実験を行い、上記特性を満足するか確認する。本回路は、スナバコンデンサに蓄えられたエネルギーを回収・活用するため、入力電流の小さい範囲でスイッチング時に電流の上昇率が高く、入力電流に歪が生じる。そこで、ソフトスイッチングが達成可能な条件内で一時的にスイッチングを停止し、臨界モードの電流パルス密度を制御する入力電流波形改善制御回路をシミュレーションを通じて開発する。開発設計を終え次第製作し、試作機に組み入れ、その効果を実験により確認し、正弦波入力電流と入力電流総合歪率 5% 以下を達成する。

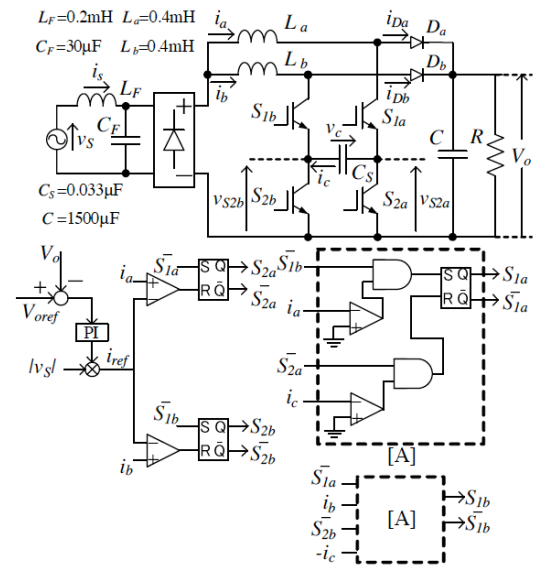


図 2 制御ブロック図

(3) 平成 26 年度は入力電流波形改善制御を含む提案 AC/DC コンバータの入力電流波形に着目し、入力フィルタの小型化等も視野に理論的見地から解析を行い、一層の高調波電流の低減を探る。

(4) 昇降圧型 DC/DC コンバータや降圧型 DC/DC コンバータに対して、インターリーブ動作を積極的に活用する本高効率スイッチング手法の適用を検討し、シミュレーションと実験を通じて有効性を検討する。

4. 研究成果

(1) 図 2 に提案する AC/DC コンバータの主回路構成と制御ブロック図を示す。本制御は、出力電圧 V_o とその指令値 V_{oref} の偏差をとり、比例積分補償器 PI を介して電源電圧と同相の正弦波絶対値と乗算することで入力電流指令値 i_{ref} を算出している。電流制御に関するスイッチングの基本動作は以下の通りである。

- ① S_{1a} と S_{2a} と S_{2b} を ON し、 i_a が増加する。 L_a により i_a の立ち上がりが遅れ、ソフトスイッチングが達成される。
 - ② i_a が指令値に達すると S_{2a} を OFF し、電流は C_S を介して S_{2b} に転流する。 C_S により v_{S2a} の立ち上がりが遅れるためソフトスイッチングが達成される。
 - ③ C_S が充電され、 i_c が 0 になった時点で S_{1a} を OFF、 S_{2a} を ON する。電流 0 でのスイッチングによりソフトスイッチングが達成される。
 - ④ i_b が 0 の条件で S_{1b} を ON する。電流 i_b は C_S から放電される経路で流れ、その後、①と同様に流れ、①と同様にソフトスイッチングとなる。
- 以降、②、③と同様にスイッチングし、その後、①の動作に戻る。以上の動作により、

i_a と i_b の位相がずれてインターリーブ動作となり、電源電流高調波の低減が期待できる。なお、試作機に用いた各スイッチング素子は逆素子型 IGBT GT50J121 とダイオード FML-36S である。

図 3 に入力波形を、図 4 に i_{ref} , i_a , i_b 波形を示す。入力電流はほぼ正弦波に制御され、入力力率は 98% 以上を達成し、 i_a , i_b は位相がずれてインターリーブ制御が達成されていることが確認できる。

図 5~7 にスイッチング時の各波形を示す。スイッチング時での電流や電圧の緩やかな立上がりりと電流ゼロでのスイッチングが確認でき、ソフトスイッチングが達成できている。

(2) 4 (1) に示した④の経路におけるリアクトル電流は、 C_s の放電によりその電流増加時の始まりの傾きを一時的に大きくし、電流指令値が 0 の付近においては電流指令値に追従できない期間が生じ、入力フィルタを通した電源電流波形に歪みが生じてしまう特性を有している。その対策として、図 1 の回路[A]中の SR フリップフロップを図 8 に置き換え、電流が指令値に追従しない期間だけ、追従しない量に比例して S_{1a} , S_{1b} の ON スwitching を一時的に停止させ、臨界モード制御の波形と波形の隙間を意図的に広げることで電流の平均値を電流指令値に等しくなるスイッチング停止法の制御を行う。

図 9,10 にスイッチング停止法適用前と後の i_a , i_b , i_s 波形を示す。臨界モード時のリアクトル電流波形の間隔が広がり、停止法制御が良好に行われていることが確認できる。多少歪みが残っているものの、電源電流 i_s のゼロクロス付近のステップ的歪みが低減できていることが確認できる。また、入力力率が 98% 以上、入力電流高調波歪率 4.6%、出力電圧変動率 1% 以下の一定出力電圧制御が達成できていることが確認できた。

(3) 図 11 に AC/DC コンバータ動作時の入力電流波形の概形図を示す。ここで、スイッチングの状態における図 11 の各期間を Mode(1)~Mode(3)に分けて考えると各期間はそれぞれ式 (1)~(3)の時間を要する。

$$t_1 = \left\{ \alpha - \left(\sin^{-1} \frac{\omega_f E}{\omega_0 (E + V_o)} \right) \right\} / \omega_f \quad (1)$$

$$t_2 = -\frac{L}{R_{sw}} \ln \left(\frac{i_{ref} - E/R_{sw}}{i_{lp} - E/R_{sw}} \right) \quad (2)$$

$$t_3 = -\frac{L}{R_{sw}} \ln \left(\frac{(V_o - E)/R_{sw}}{i_{ref} + (V_o - E)/R_{sw}} \right) \quad (3)$$

ここで、 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_s}$, $\sigma_0 = R_{sw}/2L$, $\omega_f = \sqrt{\omega_0^2 - \sigma_0^2}$, $\alpha = \tan^{-1}(\omega_f/\sigma_0)$, R_{sw} はスイッチの ON 抵抗である。インターリーブ制御効果が最大となるスイッチングの位相差は 180 deg であるため、スイッチ $S_{1a} \sim S_{2b}$ のスイッチング速度から C_s の値を決定し、

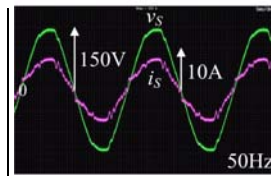


図 3 入力波形

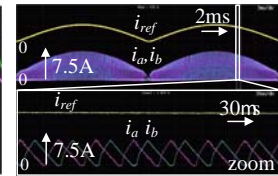


図 4 i_{ref} , i_a , i_b 波形

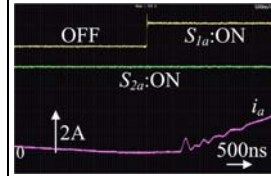


図 5 S_{1a} ON 時の i_a 波形

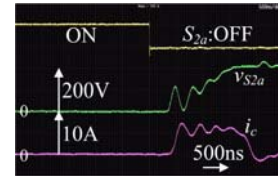


図 6 S_{2a} OFF 時の v_{S2a} , i_c 波形

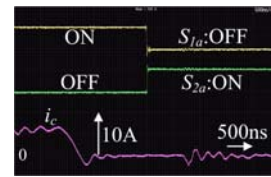


図 7 S_{1a} OFF, S_{2a} ON 時の i_c 波形

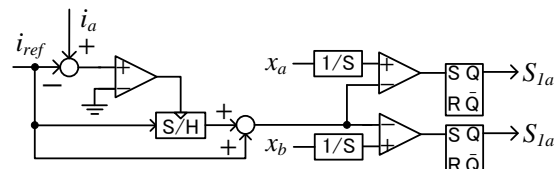


図 8 スwitching 停止法の追加ブロック図

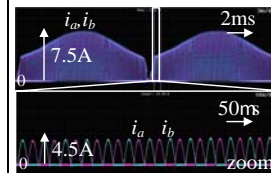


図 9 停止法適用前の i_a , i_b , i_s 波形

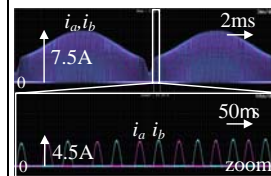
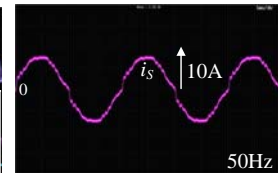


図 10 停止法適用後の i_a , i_b , i_s 波形

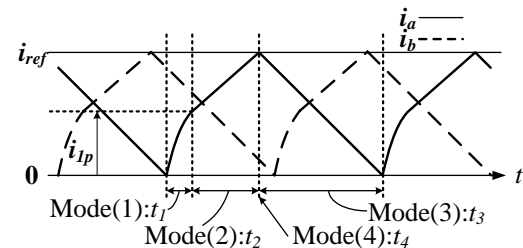
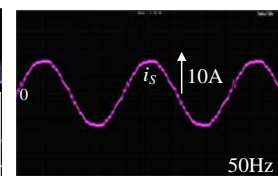


図 11 入力電流波形の概形図

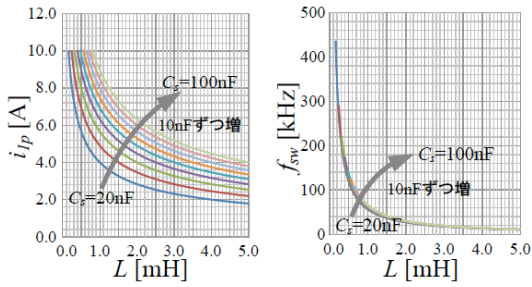
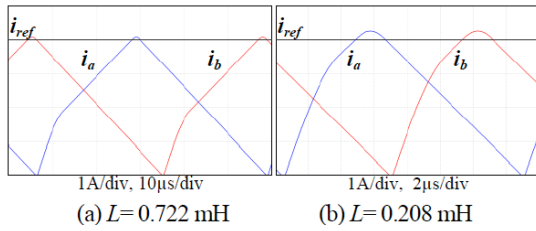


図 12 L に対する i_{ip} , f_{sw} の変化 ($E=100V$, $i_{ref}=10A$)



(a) $L=0.722$ mH (b) $L=0.208$ mH

図 13 入力電流拡大波形

以下の条件でリアクトル $L(L=L_a=L_b)$ を設計する。

- ① スイッチング周波数 $f_{sw}=1/(t_1+t_2+t_3)$ が 20kHz 以上
- ② Mode(1) のピーク電流 i_{ip} になるべく小さい
- ③ t_1+t_2 と t_3 の差が小さい

また、上記の条件に加え、電源電圧一定で、出力 C の代わりに直流電源が接続されているものとする。

図12(a), (b)に L と i_{ip} 及び f_{sw} の関係を示す。上記条件③は L が大きいほど条件が合い、条件①と②より L を求めると、 $C_s=33$ nF の場合は $L=0.722$ mH となった。この時のシミュレーションによる入力電流の拡大波形を図13(a)に示し、比較のため、 $L=0.208$ mH の場合の入力電流の拡大波形を図13(b)に示す。(a)において、 i_{ip} 及び $t_1/(t_1+t_2+t_3)$ が減少し、 i_a と i_b の位相差が 180 deg に近づくことを確認できた。

(4) 図14にインターリーブ動作を積極的に活用する本高効率スイッチング手法を適用した昇降圧 DC/DC コンバータの主回路と制御ブロック図を示す。図15にソフトスイッチング時の各部シミュレーション波形とリアクトル電流 i_a , i_b を示す。図15より各スイッチの ON/OFF によって i_a と v_{S2a} の立ち上がりやゆるやかに増加してソフトスイッチング動作が行われていることがわかる。また、 i_a と i_b は互いに位相がずれてインターリーブ動作が行われている。なお、 V_o も良好に昇降圧制御され、一定に制御されていることが確認できた。

次に、図 16 に本高効率スイッチング手法を降圧型 DC-DC コンバータに適用した場合の主回路と制御回路を示す。図 17 にリアクトル電流 i_a , i_b とソフトスイッチング時の各部波形を示す。 i_a , i_b のピーク値は指令値に追

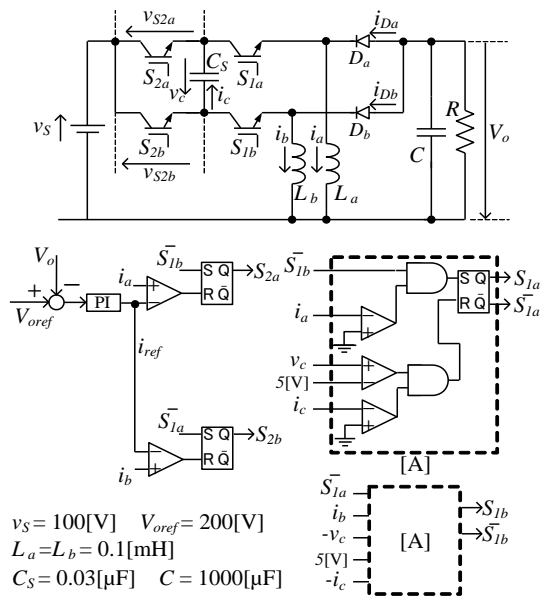


図 14 本手法を適用した昇降圧 DC/DC コンバータ

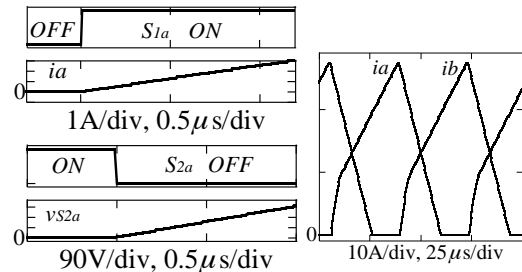


図 15 ソフトスイッチング時の各部波形とリアクトル電流 i_a , i_b

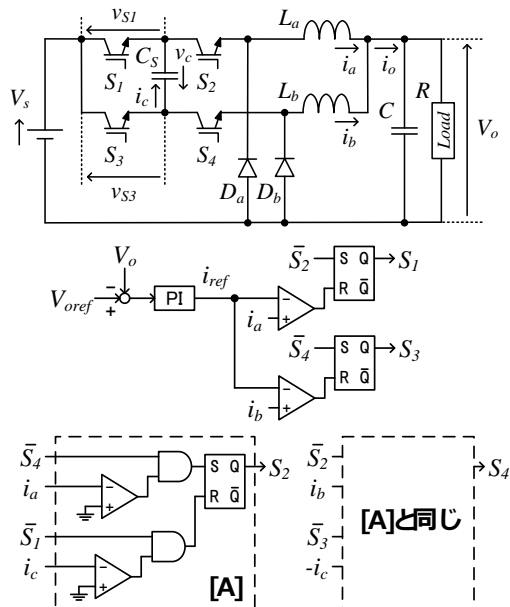


図 16 本手法を適用した降圧型 DC-DC コンバータ

従し、それぞれの電流はゼロになってから増加する臨界モード制御が確認できる。また、電流 i_a , i_b の位相が大きくずれて流れるインターリーブ動作が確認できる。スイッチングにおいては、リアクトルやスナバコンデンサ

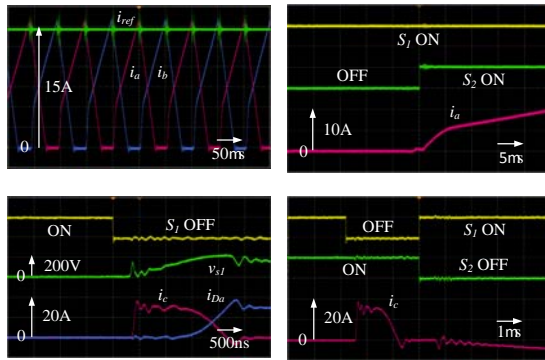


図 17 リアクトル電流と各部波形

により電流や電圧の立ち上がりが緩やかとなり、ソフトスイッチングの達成が確認できる。なお、本コンバータの出力電力 0.87kW ~ 1.4kW 時の効率は 94.5%以上であった。

以上の結果より、本研究で提案した「ロスレススナバを組み入れたインターリーブ式高効率 AC/DC コンバータ」はインターリーブ動作を積極的に利用し、一つのスナバコンデンサと臨界モードを積極的に活用することにより、2倍の電力を高効率・高力率で直流に変換できる手法であることをシミュレーションと実験を用いて実証することができた。また、開発した高効率スイッチング手法は昇降圧型および降圧型 DC/DC コンバータにも適用できることをシミュレーションと実験により確認することができ、当初の目的を達成することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 阿部晃大, 安東至, 落合政司, 「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 PFC 回路の実験的検討」, 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 2G22, 2012 年 8 月 31 日, 秋田県立大学本荘キャンパス (秋田県・本荘市)
- ② 福田浩輝, 安東至, 「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 DC-DC コンバータ」, 高専シンポジウム講演要旨集, C-04, p. 146, 2013 年 1 月 26 日, 仙台高等専門学校名取キャンパス (宮城県・名取市)
- ③ 阿部晃大, 松橋正倫, 安東至, 落合政司, 「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 PFC 回路の波形改善」, 電気学会全国大会講演論文集, 4-050, 第 4 分冊, p. 88-89, 2013 年 3 月 20 日, 名古屋大学東山キャンパス (愛知県・名古屋市)
- ④ Itaru Ando, Kodai Abe, Masashi Ochiai, Kiyoshi Ohishi, "Soft-Switching-Interleaved Power Factor Correction Converter with Lossless

Snubber", Proc. of the IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, pp.7214-7219, 13/11/2013, (Vienna・Austria)

⑤ 中村友陽, 安東至, 「インターリーブ式ソフトスイッチング PFC 回路の一設計法」, 高専シンポジウム講演要旨集, P1-16, 2015 年 1 月 10 日, 函館工業高等専門学校 (北海道・函館市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安東 至 (ANDO, Itaru)

秋田工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号 : 20212665

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

大石 潔 (OHISHI, Kiyoshi)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号 : 40185187