

平成 30 年 10 月 4 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05940

研究課題名(和文) 金属熱処理加工を目的した誘導加熱用新方式高周波共振形インバータの開発

研究課題名(英文) Development of High-Frequency Resonant Inverters for Metal Hardening Applications

研究代表者

三島 智和 (Mishima, Tomokazu)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：40370019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、金属熱処理加工(焼き入れ、焼き戻しなど)を目的とする誘導加熱電源への応用を主目的とした高周波共振形電力変換装置に取り組んだ。3カ年の研究期間中に4種の新回路方式を開発し、その有効性を実機試験により検証した。まず、時分割高周波インバータを開発した。続いて、共振インダクタレス・時分割高周波インバータを2方式あらたに開発した。実験の結果、95%超の高効率の達成を確認した。

さらに、商用周波から高周波を直接生成するシングルステージAC-AC変換器を開発した。少ない電力変換段数により97%超の高効率性と、電源電圧センサ類の除去により低コスト高信頼性の実現に成功した。

研究成果の概要(英文)：The high frequency(HF) resonant inverters for metal hardening applications have been developed in this research project. Four kinds of new dc-ac inverters and ac-ac converters have been proposed, and their feasibility has been clarified by experiment. The time-sharing dc-ac HF inverter is developed which has the excellent features of cost-effective power circuit and low switching losses as well as good electromagnetic compatibility. High efficiency over 95% has been confirmed in a 500W-100kHz prototype. The second and third converters developed in the project are based on a resonant inductor-less topology under the principle of time sharing.

The fourth type of proposed resonant convert is a single-stage low frequency- high frequency ac-ac converter. The High-efficiency over 97% and sound power quality of line current have been demonstrated by 3kW-40kHz prototype with e ferromagnetic metal induction heating load.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：電力変換 パワーエレクトロニクス 高周波誘導加熱 高周波インバータ 周波数変換 金属熱処理

1. 研究開始当初の背景

自動車や船舶用金属部品の製造には、加熱効率や CO2 排出量の削減の観点から高周波誘導加熱が有効である。耐圧や電流およびコストパフォーマンスに優れた絶縁ゲートバイポーラトランジスタを適用するにあたり、従来ではその動作周波数は 100kHz に止まり、さらなる高周波誘導加熱システムには対応できない問題があった。

2. 研究の目的

パワー半導体スイッチの動作周波数に対して過倍波を出力する高周波インバータを開発する。これより、動作周波数を抑制しながら高周波電力が生成可能となり、IH 負荷にとり低歪の高周波電流を効率的に生成できる。また、スイッチング周波数の有効利用に基づいた時分割倍周波インバータに対して、商用周波から高周波を直接生成し、電力変換段数を抑制した高周波インバータ・コンバータシステムを開発する。

3. 研究の方法

3.1 時分割高周波インバータの提案と実機検証

電流時分割高周波インバータとして、以下の 4 方式回路を開発した。

- a. ゼロ電流ソフトスイッチング(ZCS)高周波インバータ
- b. 共振インダクタレスゼロ電流ソフトスイッチング(ZCS)高周波インバータ・コンバータ
- c. 多相磁気結合を用いた共振インダクタレス ZCS 高周波インバータ・コンバータ

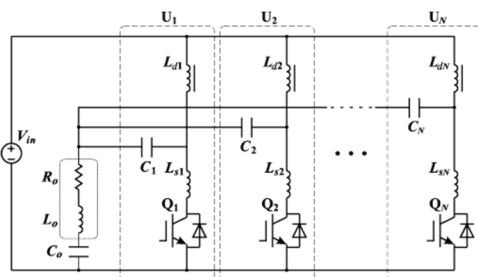
3.2 金属熱処理応用シングルステージ周波数変換器の提案と実機検証

4. 研究成果

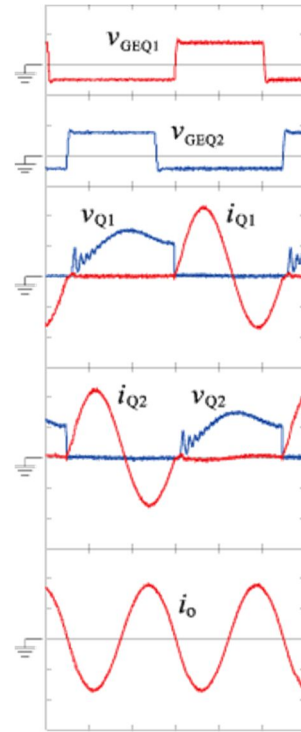
4.1.a ZCS 高周波インバータ

図 1 に回路構成と実測波形さらに効率結果を示す。スイッチング周波数 50 kHz から 100kHz を直接生成しており、所望の結果が得られている。最高効率 95%を達成した。

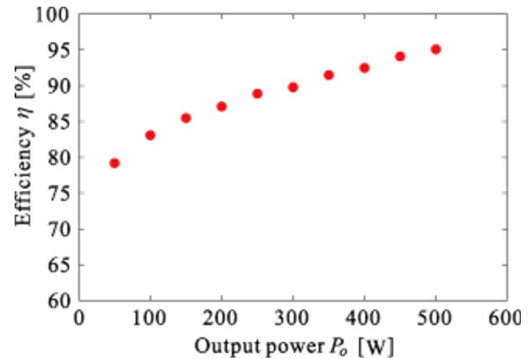
4.1.b 共振インダクタレス ZCS 高周波インバータ・コンバータ



(a)回路構成



(b)



(c) 実測効率

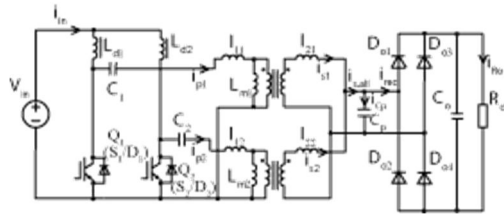
図 1 . ZCS 高周波インバータ

図 2 にパワー半導体スイッチのソフト転流用インダクタを除去した ZCS 高周波インバータを示す。図 1 の回路構成より誘導性負荷のもつインダクタンス成分を利用し、パワー半導体素子のソフトスイッチングを実現できる回路方式として新たに開発した。図 2 の実測波形と効率結果から、倍周波動作と同時に 80%以上の電力変換効率を得られた。

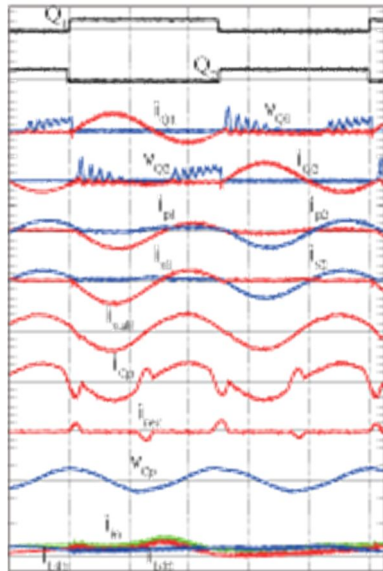
4.1.c 多相磁気結合を用いた ZCS 高周波インバータ・コンバータ

インピーダンス整合トランス(マッチングトランス; MT)を 1 つの磁性材料で構成した同期結合方式 ZCS 高周波インバータ・コンバータシステムを開発した。図 3 にその実証結果を示す。先に提案した個別 MT 方式高周波インバータと対比して、同様に倍周波を達成し

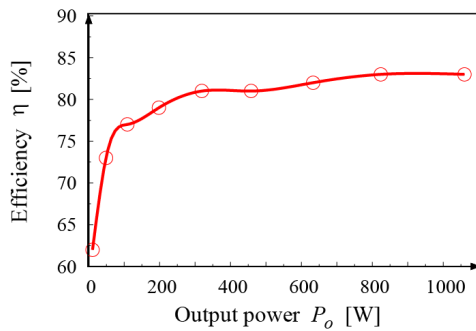
ており、磁気結合による装置の小型軽量化も達成可能であることを実証した。



(a)回路構成



(b)実測波形

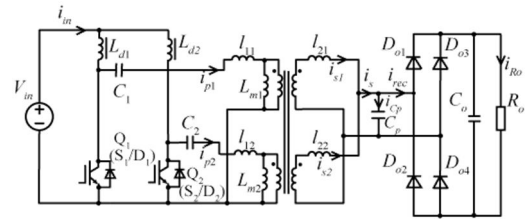


(c) 実測効率曲線

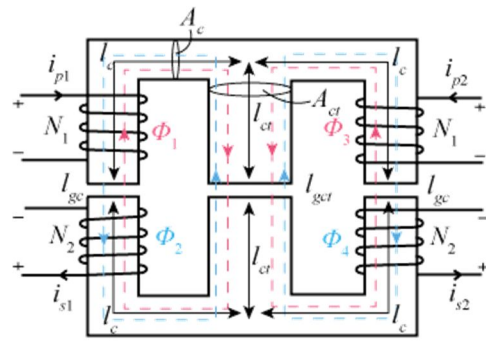
図2. 共振インダクタレス時分割高周波インバータ・コンバータ

#### 4.2.b 共振インダクタレス ZCS 高周波インバータ・コンバータ

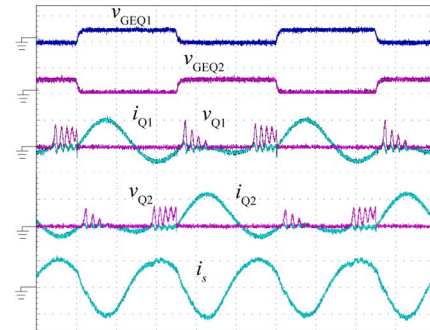
前項高周波コンバータにおける複数の高周波トランスを一体化した多相磁気結合高周波インバータ・コンバータ新たに開発した。回



(a)回路構成



(b)多相インダクタモデル



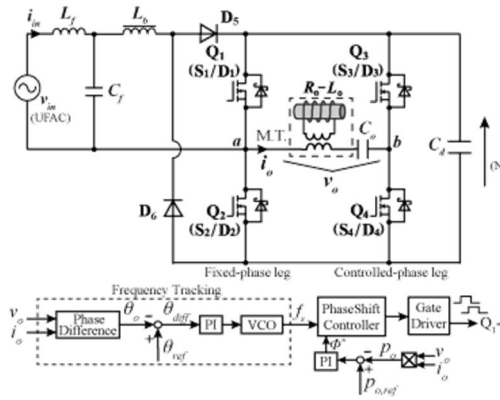
(c)実測波形

図3. 多相磁気結合方式時分割高周波インバータ・コンバータ

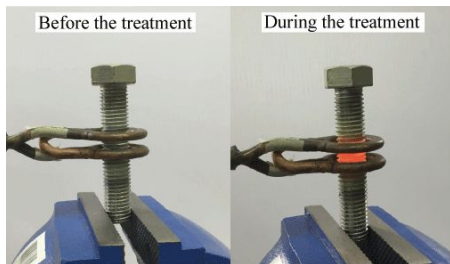
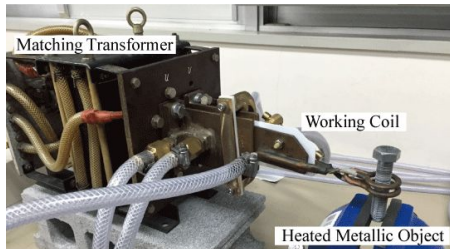
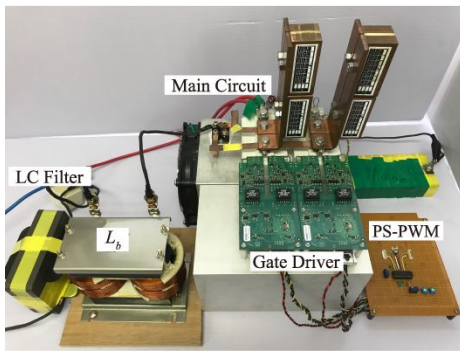
路構成と多巻線トランスおよび実験波形を図3に示す。同様に倍周波動作と高周波出力動作を確認できる。なお、多相トランスによる鉄損の増加については、個別方式と比較し大幅な増加は現れないことを確認している。

#### 4.2.c シングステージ AC-AC 周波数変換器

商用周波数交流から高周波交流を直接生成する回路を開発した。回路構成を図4(a)に示す。



(a)回路構成



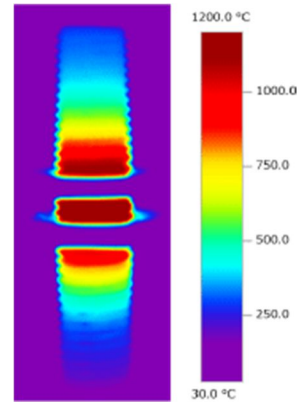
(b)試作装置外観

図 4 (b) に試作装置の外観を示す。金属ボルトの表面焼き入れによるボルト加熱状況を同図に表す。これより、高周波誘導加熱の様子がわかる。また、図 4 (c) にサーモグラフィーを示しており、1200 の高周波加熱を実現していることがわかる。

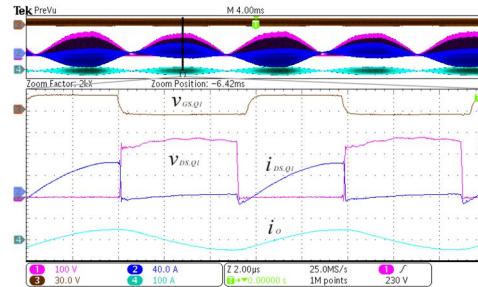
試作装置における実測動作波形を図 4(d) に示す。これより、商用周波電源から高周波を直接生成する過程を実証されることとなる。

Zu

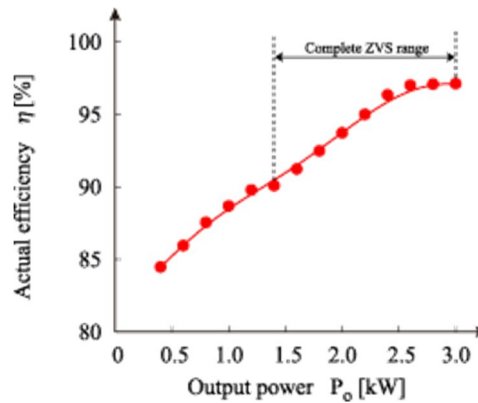
図 4(e) における電力変換効率として、97% を超える高効率を実現している。



(c) 金属負荷



(d)



(e)実測効率特性

図 4 . シングルステージ商用周波 高周波 AC-AC コンバータ

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(1) T. Mishima, S. Sakamoto, and C. Ide,

“ZVS Phase Shift PWM-Controlled Single-Stage Boost Full Bridge AC-AC Converter for High Frequency Induction

Heating Applications,” IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol.64, no.11, pp.2054-2061, Mar. 2017.

(2)S.Sakamoto, T.Mishima, and C.Ide, “A Phase-Shift PWM-Controlled ZVS Boost Full-Bridge AC-AC Converter for Metal Surface High-Frequency Induction Heating Applications,” Proc. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Expositions (ECCE 2016), pp.1-7, Sep. 2016.

(3)K.Konishi, T.Mishima, and M.Nakaoka, “A Novel Time-Sharing Current-Fed ZCS High-Frequency Inverter-applied Resonant DC-DC Converter for Inductive Power Transfer,” Pro.2016 IEEE Applied Power Electronics Conference(APEC), pp.1780-1787, Mar. 2016.

(4) T.Mishima and M.Nakaoka, “A Time-Sharing Principle-based Current-Fed ZCS High-Frequency Resonant Self-Commutated Inverter for Inductive Power Transfer,” Proc. 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Expositions (ECCE), pp.2027-2033, Sep. 2015.

(5)T.Mishima, K.Konishi and M.Nakaoka, “Current-Source ZCS High-Frequency Resonant Inverter based on Time-Sharing Frequency Doubler Principle and Induction Heating Applications,” Proc. 11th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), pp.698-603, Jun. 2015.

〔雑誌論文〕(計 5 件)

(1)坂本修一、三島智和、井出千明:「高周波 IH 応用 SiC-MOSFET シングルステージ ACAC コンバータの検討」、平成 29 年電気関係学会関西連合大会講演論文集

(2) 花内雅紀・三島智和:「多巻線高周波トランスを導入した時分割駆動 ZCS 直並列共振形コンバータ」、平成 29 年電気関係学会関西連合大会講演論文集

(3) 花内雅紀・三島 智和:「時分割方式電流形 ZCS 高周波インバータを応用した昇圧 DC-DC コンバータ -第一報-」、平成 29 年度電気学会産業応用部門大会講演論文集

(4) 坂本修一、三島智和、井出千明:「高周波 IH 応用シングルステージ ZVS-PWM AC-AC コンバータにおける共振周波数追従制御法の一検討」、平成 29 年度電気学会産業応用部門大会講演論文集

(5) 坂本修一、三島智和、井出千明:「高周波 IH 金属熱処理応用シングルステージ AC-AC コンバータの ZVS 動作の検証」、平成 29 年度電気学会全国大会講演論文集

(6) 坂本修一、三島智和、井出千明:「高周波 IH 金属熱処理応用シングルステージ AC-AC コンバータの検討」、第 213 回パワーエレクトロニクス学会定例研究会

(7) 小西響平・三島智和・中岡睦雄:「共振電流位相差制御を適用した非接触給電応用時分割電流形 ZCS 高周波インバータ」、電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会

(8) 小西響平・三島智和・中岡睦雄:「Si-IGBT/SiC-SBD ハイブリッドパワーデバイスを用いた非接触給電 ZCS 高周波共振形 DC-DC コンバータ」、平成 27 年度電気関係学会関西連合大会

(9) 小西響平・三島智和・中岡睦雄:「Si-IGBT/SiC-SBD パワーモジュールを適用した時分割電流形 ZCS 高周波インバータとその非接触給電応用」、電気学会電子デバイス/半導体電力変換合同研究会

(10) 小西響平・三島智和・中岡睦雄:「時分割倍周波電流形 ZCS 高周波インバータに非接触給電装置への応用 -実証評価第

一報-」、電子情報通信学会電子通信工  
ルギー研究会 / 無線電力伝送研究会

〔学会発表〕（計 10 件）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：誘導加熱用シングルステージ商用周波  
-高周波コンバータおよびその制御方法

発明者：三島智和 井出千明

権利者：神戸大学 / 富士電子工業

種類：特許権

番号：特願 2016 091565

出願年月日：平成 28 年 4 月 28 日

国内外の別：国内

取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三島智和 (Mishima, Tomokazu)

(神戸大学・海事科学研究科・准教授)

研究者番号：40370019

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：