



Researches on Single-Phase Direct AC-AC Power Converters for High-Frequency Induction Heating Applications

董，貴義

(Degree)

博士（工学）

(Date of Degree)

2025-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9240号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496521>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 董 貴義

専 攻 海事科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Researches on Single-Phase Direct AC-AC Power Converters for
High-Frequency Induction Heating Applications

(高周波誘導加熱用単相ダイレクト AC-AC コンバータに関する研究)

指導教員 三島 智和 准教授

This thesis summarizes the research conducted by the author under the guidance of Professor Tomokazu Mishima of the Department of Marine Technologies and Engineering, Faculty of Maritime Sciences, Kobe University, from April 2022 to 2025, focusing on the power supply for induction heating systems, particularly on single-phase high-frequency resonant direct AC-AC converters.

Induction heating, as a representative application of high-frequency power electronics in household and consumer fields, typically operates at frequencies of tens of kilohertz (kHz), heating metal loads through the principle of electromagnetic induction. The power converter, which transforms mains electricity into high-frequency power, is the core component of an induction heating system. Compared to traditional multi-stage high-frequency inverters, direct AC-AC converters offer several advantages, including simplified circuit structures, higher energy efficiency, and better adaptability to compact designs. These characteristics make them particularly suitable for household and industrial applications.

The direct AC-AC topology eliminates the need for an intermediate DC stage, significantly reducing the system's size, weight, and overall cost, while improving reliability and performance.

However, in previous research, such AC-AC converters have commonly operated under pulse frequency modulation (PFM) control methods, which have introduced several limitations. These include audible interference among multiple devices, challenges in designing EMI filters, and difficulties in controlling heating depth based on the skin effect.

To overcome the limitations of traditional PFM control methods, the author proposes three key innovations:

1. Pulse Density Modulation (PDM): This method ensures finer control over the output power and reduces the acoustic noise and electromagnetic interference typically associated with PFM.
2. Constant Off-Time Pulse Coding Modulation (COT-PCM): This approach addresses several drawbacks of PDM, including instability in switching frequency, acoustic noise, and limited efficiency under varying load conditions, while ensuring more reliable power control and simplified resonant component design.
3. Integration of a Variable Inductor (VI): This addition allows for dynamic control of resonant frequency and power transfer, optimizing performance across different operating points.

These methods significantly enhance the performance of induction heating systems, including improved power control precision, reduced input current ripple, and minimized acoustic noise. The proposed converter and control methods were thoroughly validated in practical scenarios, including standard cooking appliances and innovative fluid water induction heating systems, demonstrating their versatility and effectiveness.

Chapter 1 introduces the research background, objectives, and significance of this study. It primarily covers the basic principles of induction heating, the evolution and structure of previous multi-stage high-frequency inverters and leads to the introduction of the direct AC-AC converter.

Chapter 2 describes the structure and fundamental operating principles of the direct AC-AC converter, with a particular focus on the operating principles and constraints of its two operating modes. It also explains how full soft-switching operation is maintained while achieving soft-switching during mode transitions. This chapter provides the fundamental knowledge necessary for the subsequent chapters.

Chapter 3 describes the PDM of direct AC-AC converter. In contrast to the multi-stage and traditional single-stage power conversion systems, the proposed direct AC-AC converter not only simplifies the topology of power conversion but also enhances the efficiency, soft-switching, and EMI performance, optimizing the overall system performance. This converter features a power control methodology utilizing the reverse conducting and reverse blocking modes of a bidirectional switch based on pulse density modulation, which is suitable for a wide range of soft switching and fixed-frequency operations. The performance of the direct AC-AC converter is investigated by experiments using a 1.2 kW/56 kHz prototype, where the high-frequency load power regulation and power conversion efficiency are revealed, and soft switching is verified. The practical effectiveness of the power converter and power control scheme is evaluated.

Chapter 4 describes a new pulse modulation for single-phase direct AC-AC converters in fluid water IH systems, which is defined as COT-PCM. The proposed pulse modulation is suitable for fixed-frequency power control in a direct AC-AC converter, featuring high performance of the skin effect, reduction of input (utility line) current fluctuations, and minimization of the size and capacity of the filtering components. Furthermore, this approach can overcome the technical issues of PFM and PDM, such as audible noises with respect to power control. The essential performance of the proposed pulse modulation is demonstrated by an experiment based on a 2 kW/40 kHz prototype for fluid water IH appliances in home and consumer applications. The

high-frequency load power regulation, power control range and resolution, power conversion efficiency, and soft-switching of a bidirectional switch are revealed, and the validity is evaluated from a practical point of view.

Chapter 5 describes a new prototype of a direct AC-AC converter for IH applications, which is the first proposal for the application of VI technology to a direct AC-AC converter, thereby achieving fixed-frequency control with a wide soft-switching range. Combining VI technology enhances IH system flexibility and resolves issues of mechanical noise and EMI caused by variable frequency modulation, which are prevalent in conventional IH methods. This chapter analyzes the proposed converter's operation, explaining the VI control strategy for fixed-frequency power regulation, with key VI parameters designed using a reluctance model. Furthermore, experimental verification with an 850 W/50 kHz prototype confirms the fundamental performance capabilities of the proposed direct AC-AC converter. This evaluation demonstrates the high-frequency load power regulation and power conversion efficiency, and further confirms the implementation of soft-switching. The proposed converter achieved a high efficiency of 96.0%, which is significant for reducing energy loss in IH systems.

Chapter 6 summarizes the research achievements and discusses future prospects.

This thesis has presented a thorough exploration of advanced control methodologies for direct AC-AC converters, specifically targeting induction heating applications. Throughout the study, substantial progress was made in developing innovative power control strategies that significantly enhance the efficiency and functionality of induction heating systems across various applications.

The introduction of PDM marked a pivotal advancement. These methodologies facilitated finer control over power output, reduced electromagnetic and acoustic noise, and minimized the input current ripple, thus addressing the primary limitations associated with traditional PFM. The integration of VI and COT-PCM further refined the system's performance by enabling dynamic control of the resonant frequency and power transfer, which optimized the efficiency and flexibility of induction heating systems.

Experimental validations conducted across different prototypes — from IH cooker to fluid water induction heating systems — demonstrated that the proposed solutions not only meet but exceed the current standards in terms of power regulation, conversion efficiency, and environmental impact. Specifically, the high-frequency inverter prototypes showcased exceptional load power regulation and confirmed the benefits of soft-switching capabilities, significantly reducing energy losses and enhancing overall

system reliability.

Moreover, the successful implementation of these technologies in practical scenarios, such as standard cooking appliances and innovative industrial applications, illustrates their potential to revolutionize the approach to induction heating. By reducing the complexity of the circuit design and improving the adaptability to compact configurations, this research contributes to making high-frequency power electronics more accessible and beneficial for both household and industrial uses.

As the demand for efficient and environmentally friendly heating solutions continues to grow, the findings from this dissertation underscore the viability of using advanced direct AC-AC converters in meeting these needs. Looking forward, the insights gained from this research could pave the way for further innovations in power electronic devices and systems, fostering the development of more sustainable and energy-efficient technologies.

In summary, this dissertation has made substantial improvements in the field of induction heating, providing validated solutions that have been detailed in several publications and protected by multiple patents, greatly enhancing their potential for industrial adoption. The findings of this research effectively address the growing demand for energy-efficient and environmentally friendly heating solutions.

氏名	董 貴義		
論文 題目	Researches on Single-Phase Direct AC-AC Power Converters for High-Frequency Induction Heating Applications (高周波誘導加熱用単相ダイレクト AC-AC コンバータに関する研究)		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	准教授	三島 智和
	副 査	教授	佐俣 博章
	副 査	教授	長松 隆
	副 査	准教授	山本 茂広
	副 査		
要 旨			
<p>本博士学位研究論文は、産業機器や家電・業務民生機器などにおいて電気加熱技術の一種として古くから知られている電磁誘導加熱（以下、単に誘導加熱または Induction heating: IH）に適する電力変換装置について、その高性能化に向けた回路方式および電力制御手法を独自に探求し、その有用性について試作機実験を通じて明確にされた結果および考察を論じている。全体として以下の6章から構成されている。</p> <p>まず、第1章では、誘導加熱の原理を電磁気学的観点から解説し、単相高周波誘導加熱システムに焦点当てた場合に加熱エネルギーを創出するための電力変換回路方式について、多段式、1段式（シングルステージ）および直接周波数変換（ダイレクト変換）方式の3カテゴリーに分類した上で、各方式のもつ特徴やシステム構成要素に対する定性的特性を比較している。これより、本研究の目的であるダイレクト AC-AC 変換器として、現状では固定周波数の電力制御技術が確立しておらず、また炭化珪素(SiC)パワーランジスタなどのワイドバンドギャップパワー半導体デバイスを効果的に活用する IH 用単相ダイレクト AC-AC 変換器技術を探求することの重要性を論じている。</p> <p>第2章では、本研究を通した基盤技術である「単相ダイレクト AC-AC コンバータ」について、その回路構成および回路動作の基本となる双方スイッチ（ここでは、自励式ディスクリットデバイスの2直列逆接続により構成）の逆導通(Reverse conduction: RC)モードと逆導通阻止(Reverse blocking: RB)モードについて、時間領域における解析を中心に詳述されている。これによると、誘導性負荷(IH 負荷)から電源への瞬時的電流回生区間を有する RC モードと、負荷への電力供給区間のみを有し短期間にて電力供給する RB モードをある一定の法則にて切り替えると、連続的な高周波電力制御が可能であると示唆されている。</p> <p>これを踏まえ、第3章では RC/RB モードの切り替え手段として、双方スイッチの駆動パルスパターンをパルス密度変調(Pulse Density Modulation: PDM)を適用した、単相ダイレクト AC-AC 変換器が提案されている。このパルス変調によれば、従来のダイレクト AC-AC 変換器での電力制御として主流であったパルス周波数変調(Pulse Frequency Modulation: PFM)に対して、固定周波数にて IH 負荷への電力供給区間を調整できることから、回路を構成する受動素子の設計簡易化に加えて、複数の IH 負荷で生じる動作周波数の差異に起因する電磁ノイズなどを抑制可能であると述べられている。電磁調理器を模擬負荷にもつ電力容量 1.2kW-動作周波数 56kHz の試作機を構築し、双方向スイッチのソフト転流動作やダイレクト周波数変換動作、さらに PDM 電力制御特性が明らかにされ、97%を超える電力変換効率を実現したことが述べられている。なお、本研究成果は後述の論文[A1],[B1],[C1]にて公表済である。</p> <p>第4章は、PDM 電力制御で新たに問題点として浮上した、電力制御周期に起因する電源電流の低周期ノイズと設定周波数（スイッチング周波数 対 PDM 制御周波数の比率）制限による、スイッチング周波数の制限を解決する手段として、新たに RC/RB モード組み合わせ制御1周期内でそれぞれのオフ時間を固定しながら、オン時間を任意の周期に設定する「Constant-Off-Time Pulse Coding Modulation (COT-PCM)」を独自に提案している。この手法によれば、双方向スイッチのオフ期間は IH ワークコイルおよび負荷インダクタンス成分からなる等価インダクタンスと並列キャパシタで決まる共振区間を確保しながら、RC/RB モードのオン期間の補完性を保ちつつ調整すれば、パワー半導体スイッチのソフト転流を維持しながら制御周期はスイッチング周波数から大きく低下させることなく、高周波電力制御が得られる。この COT-PCM の有用性について、電磁誘導流水加熱装置（発熱体材料 SUS304）を負荷として実験手法により検証しており、電気出力 2kW-スイッチング周波数 40kHzにて単相 IH システムを構築した試験結果から、電源電流の高潮波歪みは国際規格 IEC-61000-3-2-ClassA を下回る高力率の達成に加えて、</p>			

氏名	董 貴義
----	------

PFM や PDM に対して軽負荷から 70%程度の中負荷領域まで優れた電力変換効率（最高電力変換効率 95.5%）を維持できる性能を持つことが明らかにされている。本研究成果は、国際会議論文[B2]にて公刊されており、さらに[D1]の学術論文（原著論文）にて審査中である。

第3、4章では IH 用単相ダイレクト AC-AC 変換器を構成する双方向パワー半導体スイッチのパルス変調に着目した高周波電力制御手法であるのに対し、第5章ではそのスイッチング周波数を固定しながら IH ワークコイルに直列にインピーダンス調整用可変インダクタンスを追加して、AC-AC 変換器における入力インピーダンスを連続的に調整する手法を提案している。可変インダクタは電力指令制御系からフィードバックまたはフィードフォワードにてその直流バイアス電流を調整し磁束密度を物理的に変える原理をもつ磁気増幅デバイスの1種であり、IH システムに適用した事例としては初である。なお、パルス変調は前述の RC モード単一により構成されており、可変インダクタンスに応じてスイッチオフ期間を E 級スイッチングが達成されるようオン時比率を変える手法が適用されている。定格 850W-50kHz の動作周波数を条件とした小容量単相 IH システムを構築し、最高 96%の電力変換効率を実証している。また、PFM など他のパルス変調と比較して軽負荷効率を中心に 3-4%の効率改善が示されている。なお、本研究成果は下記の学術論文（原著論文）[A2]にて公表済みである。

第6章では、第3～5章で明らかにした各提案技術の性能について総括しており、流水加熱をはじめとする各種単相 IH システムへの実応用性について考察し、今後の改善点などについても言及しながら、本学位研究論文を締め括っている。

本研究の成果は、以下の学術論文（原著論文）、国際会議録（査読付）、研究開発レター（査読付）にて自ら第1著者として公刊している。

【学術論文（原著論文）】

[A1] Guiyi Dong, Tomokazu Mishima, Hideki Omori, and Ching-Ming Lai, "A Single-Phase Class-E Direct AC-AC Converter Using Conduction Mode-Exchanged Pulse Density Modulation for Induction Heating System," IEEEJ (The Institute of Electrical Engineers of Japan) Journal of Industry Applications (Impact Factor 1.0), vol. 13, no. 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejia.23011032>

[A2] Guiyi Dong, Chuwei Lin, Ching-Ming Lai, Shiqiang Liu, Tomokazu Mishima: "A Fixed-Frequency Single-Phase Resonant Direct AC-AC Converter Integrating Variable Inductor Technique for High-Frequency Induction Heating Applications", IEEE Access (Impact Factor 3.4), vol.12, pp.177711-177722, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3495534.

【国際会議録（査読付）】

[B1] Guiyi Dong, Tomokazu Mishima, Hideki Omori and C. -M. Lai, "A Single-Phase Direct AC-AC Wireless Power Transfer System Using Conduction Mode-Exchanged Pulse Density Modulation," 2023 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Chiang Mai, Thailand, 2023, pp. 1-5, DOI: 10.1109/itecasia-pacific59272.2023.10372277.

[B2] Guiyi Dong, Shiqiang Liu, Tomokazu Mishima, Ching-Ming Lai, "Fixed-Off-Time Pulse Coding Modulation for Single-Phase Direct AC-AC Converter in Induction Heating Systems", 2024 IEEE Energy Conversion Congress and Expositions (ECCE), Phoenix, Arizona, USA, 2024, pp. 3420-3426.

【研究開発レター（査読付）】

[C1] 董 貴義, 三島智和, 大森英樹: 「高周波 IH 応用ダイレクト AC-AC コンバータの固定周波数電力制御手法」, 電気学会論文誌産業用部門 (D) ,143 巻, 6 号, pp.519-520 (2023 年 6 月)

また、現在審査中の学術論文（原著論文）として、

[D1] Guiyi Dong, Shiqiang Liu, Ching-Ming Lai, Tomokazu Mishima: "Single-Phase High-Frequency Resonant Direct AC-AC Converter with Constant Off-Time Pulse Coding Modulation for Fluid Water Induction Heating", IEEE Transactions on Industry Applications (Impact Factor 4.2) (in review).

その他、国内学会・研究会講演（査読なし）4 件、特許出願 4 件、学術受賞 2 件の実績がある。

以上、本研究は誘導加熱システムの高性能化に資する電力変換技術について、直接形周波数変換を特徴とする高周波スイッチング方式ダイレクト交流電力変換器とその電力制御手法を探索したものであり、高周波エネルギー応用機器・システムについて重要な知見を得たものとして価値のある研究成果である。提出された論文は海事科学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の董 貴義は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。