

氏名	ひろかわ たかゆき 廣川 貴之
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第631号
学位授与年月日	平成26年3月17日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程)情報・デザイン工学系専攻
学位論文題目	IH クッキングヒータ用高効率高周波共振形ソフトスイッチング電源の回路方式および電力制御法
論文審査委員	主査 山口大学 教授 田中 俊彦 山口大学 教授 大林 正直 山口大学 教授 羽野 光夫 山口大学 准教授 若佐 裕治 山口大学 准教授 大原 渡 岡山大学 教授 平木 英治

## 【学位論文内容の要旨】

パワーエレクトロニクス技術は、一般産業をはじめ、電気鉄道、電力系統、家電民生、情報通信、電気自動車、非接触給電などの分野で利用されている。なかでも家電民生の分野では、電磁炊飯器、電磁調理器、電磁給湯器、電磁スチーマなどに代表される電気エネルギーを直接熱へ変換する誘導加熱(Induction Heating: IH)用インバータの技術開発が積極的に行われており、これからの応用がまだまだ数多く考えられる分野である。

近年、安全、清潔、高い加熱効率、さらにはエネルギー問題や高齢化社会の伸展などといった観点から高周波誘導加熱技術の中でも電磁誘導加熱調理器(IH クッキングヒータ)が高い注目を浴びている。普及初期のIH クッキングヒータは、アルミや銅などの非磁性材質を鍋に使用した場合、誘導加熱の特性上鍋への電力供給が困難であった。これは、鉄や磁性ステンレスに比べて抵抗率が約1/10と非常に小さいためである。この問題を解決する一つとして、IH クッキングヒータから負荷へ供給する電流を高周波化する方法がある。これにより、鍋の表皮効果を顕著にし、みかけ上の抵抗値を大きくすることができる。一方、磁性ステンレスや鉄といった抵抗率の高い材質を鍋に使用した場合では、高周波化に伴い抵抗値が非常に大きくなるため、IH クッキングヒータとして十分な電力供給が困難となる。現在、これらの問題を同時に解決し、鉄や磁性ステンレスをはじめ、銅やアルミなど様々な材質の鍋への対応したオールメタル対応IH クッキングヒータが製品化されている。オールメタル対応IH クッキングヒータには、複数のインバータを用意し、鍋の材質に応じてインバータを切り替える方式や、3倍共振周波数を利用する方式が提案されている。しかしながら、前者の方式は部品点数が多くなり、高コスト化につながる。また、後者の方式は電源利用率が悪いため、電力変換効率の低下が懸念される。さらに、今後IH クッキングヒータが普及するためには、マルチ出力化や丸底以外の様々な形状の鍋

への対応など、さらなる高機能化が求められる。以上述べたように、近年非常に注目を浴びている IH クッキングヒータであるが、さらなる普及には下記に示すような解決すべき課題がある。

- (1) 高効率なオールメタル対応 IH クッキングヒータの実現
- (2) 小型化, 低コスト化を目的とした高周波インバータの提案および実証評価
- (3) マルチ出力化や丸底以外の様々な形状の鍋への対応

本論文では、これらの課題の解決を研究目的としている。下記に本論文の要約を示す。

第 1 章では、IH クッキングヒータの普及状況を示す。また、ガス加熱方式と IH クッキングヒータの比較を行いそれぞれの利点および欠点を明らかにする。

第 2 章では、IH クッキングヒータの技術背景について述べる。まず、誘導加熱の基本原理を説明し、誘導加熱負荷の電氣的等価回路モデルを示す。次に、実用化されているオールメタル対応化技術を紹介する。さらに、要素技術である電源高調波とその対策法、ソフトスイッチング技術による電力変換効率の向上について述べる。

第 3 章では、課題(1)を解決可能な IH クッキングヒータ用時分割制御高周波インバータを提案する。提案回路は 1 個のスイッチング素子で構成される回路を並列接続している。この回路はインバータ動作周波数を高くすること無く、高周波電力周波数を 2 倍にできるといった特徴がある。これにより、高周波動作時に問題となるスイッチング損失を大幅に低減できる。また、先に実用化されている 3 倍共振周波数方式より電源利用率が向上し、かつ回路を並列接続しているため各インバータの電流責務を半分とすることができる。したがって、高効率なオールメタル対応 IH クッキングヒータを実現することが期待できる。まず提案回路の特長、回路動作および回路定数設計法について論じる。次に回路を試作し、実験により提案回路の有用性を明らかにする。

第 4 章では、課題(2)に示した装置の小型化, 低コスト化および第 3 章で明らかになった課題(低電力領域における電力変換効率の著しい低下)を同時に解決可能な回路および電力制御法を提案する。前者は 2 つのインダクタを結合させることによる部品点数の削減、後者は電力制御法の変更により課題解決を図る。まず、提案する結合インダクタ構造を有する時分割制御高周波インバータおよび電力制御法について論じる。次に、回路体積の大部分を占めるインダクタコアのサイズを論理的に導出し、装置の小型化について検討する。さらに、試作した結合インダクタを用い、実験により測定した電力変換効率から提案する電力制御法の有用性を明らかにする。

第 5 章では、課題(3)を解決可能なマルチ出力高周波インバータを提案する。提案回路は第 3 章で提案した時分割制御高周波インバータを多段縦続接続することでマルチ出力化を実現する。また、インダクタ、キャパシタおよびスイッチング素子を共有することができるため、部品点数の削減が可能となる。したがって、装置の小型化も同時に実現することができる。まず、マルチ出力化の研究背景および提案回路について説明する。次に、マルチ出力化した際に考えられる個別電力制御法について議論する。さらに実験検証を行い、提案回路の有用性を明らか

にする。

第6章では、本研究で得られた研究成果をまとめる。

以上、本論文で提案した回路および技術を応用することで、IH クッキングヒータのさらなる普及が期待される。

## 【論文審査結果の要旨】

近年、安全ならびに高い加熱効率を特長とする電磁調理器(IH クッキングヒータ)が普及している。初期の IH クッキングヒータは、アルミや銅製の鍋などを加熱することが困難であった。鉄や磁性ステンレス製の鍋に比較し、アルミや銅製の鍋の抵抗率が約 1/10 であり、IH クッキングヒータの出力電流の制御が困難であるからである。この問題は、IH クッキングヒータが出力する電流を高周波化することで解決できる。これは、金属の鍋の表皮効果を利用し、みかけ上、鍋の抵抗値を大きくすることができるからである。しかしながら、磁性ステンレスや鉄製の鍋を加熱することができなくなる。これらの問題を同時に解決し、鉄および磁性ステンレス製鍋、銅およびアルミ製鍋に対応可能なオールメタル対応 IH クッキングヒータが販売されている。複数のインバータを用意し鍋の材質に応じてインバータを切り替える方式や、3 倍共振周波数を利用する方式が実用化されている。しかしながら、前者の方式は部品点数が多くなり、高コスト化につながる。また、後者の方式は電源利用率が悪いため、電力変換効率の低下が問題となる。したがって、IH クッキングヒータのさらなる普及には下記に示すような解決すべき課題がある。

- (1) 高効率なオールメタル対応 IH クッキングヒータの実現
- (2) 小型化、低コスト化を目的とした高周波インバータの提案および実証評価
- (3) マルチ出力化や丸底以外の様々な形状の鍋への対応

本学位論文では、これらの課題を解決できる IH クッキングヒータを提案し、その有用性を詳細に論じている。

本学位論文は6章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、IH クッキングヒータの普及状況を示すと共にガス加熱方式と IH クッキングヒータを比較し、それぞれの利点および欠点を明らかにしている。

第2章では、IH クッキングヒータの技術背景について述べている。はじめに、誘導加熱の基本原理について説明し、誘導加熱負荷の電氣的等価回路モデルを示している。次に、実用化されているオールメタル対応化技術について述べている。さらに、要素技術である電源高調波とその対策法、ソフトスイッチング技術による電力変換効率の向上について述べている。

第3章では、上記課題(1)を解決可能な IH クッキングヒータ用時分割制御高周波インバータを提案し、その有効性を明らかにしている。提案した回路方式は、1 個のスイッチング素子から構成される基本回路を並列接続している。このため、インバータ動作周波数を高くすることなく、高周波電力周波数を 2 倍にできるといった特長があり、高周波動作時に問題となるスイッチング損失を大幅に低減できる。また、先に実用化されている 3 倍共振周波数方式より電源利用率が向上し、かつ回路を並列接続しているため各インバータの電流責務を半分にすることができる。したがって、高効率なオールメタル対応 IH クッキングヒータを実現できる。提案した回路の動作原理および回路定数設計法に明らかにしている。さらに、実験装置を試作し、実験により提案回路の有用性を明らかにしている。

第4章では、上記課題(2)について第3章で指摘した体積容量の大型化および低電力領域における電力変換効率の低下を同時に解決可能な電力制御法および回路方式を提案している。はじめに、時分割制御高周波インバータの電力制御法について論じている。次に、回路体積の大部分を占めるインダクタのコアサイズを論理的に導出し、装置の小型化について検討している。さらに、実験装置を構成し、実験により電力変換効率が向上し、かつ体積容量を低減可能であることを確認している。

第5章では、上記課題(3)を解決可能なマルチ出力高周波インバータを提案している。本提案方式では、第3章で提案した時分割制御高周波インバータを多段並列接続することでマルチ出力化を実現している。また、インダクタ、キャパシタおよびスイッチング素子を共有することができるため、部品点数の削減が可能となる。提案した回路方式の動作原理とマルチ出力化した際に重要となる個別電力制御法について詳細に述べている。さらに、実験装置を構成し、提案した回路の有用性を明らかにしている。

第6章では、本研究で得られた研究成果および今後の検討課題について述べている。

#### 【本審査及び公聴会における主な質問内容】

①本学位論文では銅鍋とステンレス鍋の2種類しか比較していないが実用上は問題がないか、②鍋などを抵抗とインダクタでモデル化しているがその測定法、③第3章と第4章で提案した回路方式の効率の比較を行っているが効率改善の主な要因、④負荷抵抗値決定の根拠、などに関する質問があった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より、本研究は実用性、創造性、有効性、信頼性ともに優れ、博士（工学）の学位論文に十分値するものと判断した。