誘導加熱応用家電機器の歴史と今後の技術課題

正員 弘田 泉生*

正員 山下 秀和*

正員 大森 英樹*

正員 中岡 睦雄**

Historical Review of Electric Household Appliances using Induction-Heating and Future Challenging Trends

Izuo Hirota*, Member, Hidekazu Yamashita*, Member, Hideki Omori*, Member, Mutsuo Nakaoka**, Member

This paper presents historical progress on technology evolution of the electric and electronic household appliances using the inverter, especially for Induction-Heating applications, which have been put in practical use as the desk-top cooker for the first time at home in 1974 until being applied to the rice cooker and the multi-burner cooking heater. It also describes the future innovative evolution of the power semiconductor switching devices and the inverter circuit topologies supporting its progressive developments. Looking back its progress, the future trends on consumer power electronics is discussed on the practical problem in the future.

キーワード：誘導加熱，家電，歴史，調理器，家電用パワーエレクトロニクス

Keywords：induction-heating, electric household appliances, history, cooker, consumer power electronics

1. はじめに

現在家庭で市民権を得ている電力（電気エネルギー）利用機器（いわゆる白物家電）は、図1に示すように1960年代半ば頃までに実用化されてきた。一方半導体スイッチングデバイスにより電力周波数を変換して利便性、制御性、環境性、安全性を提供するパワーエレクトロニクス技術はこの分野で1970年代に応用が始まり、以来家電機器に多彩な技術変革をもたらしてきた。本稿ではこれらインバータ家電、とりわけ誘導加熱を応用した調理器の歴史について、半導体スイッチングデバイスの進化と高周波インバータ回路トポロジーの進化が互いに影響を与えながら進歩してきた内容を中心に述べる。

2. 調理家電の変遷

我々の暮らしの中で調理は基本的な生活行為であり、そのエネルギー源はガスや電力である。この2つのエネルギーを比較した場合、電力は火を使わないことによる安全性、

図1 家庭内電力利用機器の変遷

Fig. 1. Changes of electric household appliance.

室内の空気を汚さないという環境性と快適性，エレクトロニクスによって高精度コントロールし易いという制御性，などの点でガスに対して優位な特性を持っている。

昨今の環境志向に対応した住宅の高気密化，高齢化社会進展に伴う安全性への要求，利便性と操作制御性の追求といった社会的ニーズを背景に，オール電化住宅も急速に普及しつつある。またオール電化住宅ならずとも，上記の社

* 松下電器産業(株)松下ホームアプライアンス社
電化住設研究所
〒561-0821 豊中市日出町 2-2-8
Home Appliance & Housing Electronics Research Labs.,
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.
2-2-8, Hinode-cho Toyonaka 561-0821

** 山口大学 工学部 電気電子工学科
〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1
Department of Electrical and Electronics Engineering,
Yamaguchi University
2-16-1, Tokiwadai, Ube 755-8611

会的ニーズに合致する電気で調理ができる機器、すなわち電気コンロ（クッキングヒータ）、電気炊飯器などの調理家電については、生活の質的向上をもたらす有用な電力機器として従来から性能や使い勝手の向上が強く要望されてきた。

調理家電は戦後から急速に普及してきたものであるが、電気コンロや電気炊飯器については単純なヒータによるものであり、ヒータの耐久上の問題から 1 kW 程度の電力しか賄うことができず、火力のコントロールも自在ではなかった。従って、加熱電力が小さいために調理や炊飯の時間が長くなり、制御性の低さから微妙な調整も困難など、調理品質の劣化を招いていた。

これらは調理家電としての性能や利便性を大きく阻害する技術的な要因となり、本来安全・便利である電力を十分活用できないものとしていた。

以上を背景として、調理家電においては加熱電力と制御性の向上による技術革新が社会的にも望まれていた。そこで、電気コンロ（クッキングヒータ）や電気炊飯器の加熱電力限界の要因となっていたヒータに代わる新たな熱源として、交流電力が発生する交番磁界で負荷を直接発熱させる非接触型の誘導加熱（IH：Induction Heating）技術が目されてきた。

3. 誘導加熱調理器の原理と特長

図 2 に示すように針金のループと磁石を配置し、磁石を上下に動かすと針金に電流が流れる。これは発電の原理としてよく知られているファラデーの電磁誘導の法則（1831 年）である。もう少し詳しく言えば、磁石から発生する磁力線の内針金のループ面を貫く磁力線の量が磁石を動かすことにより変化し、その変化に応じて針金のループに起電力が生じるということになる。この電磁誘導の法則が誘導加熱調理器の基本原理である。

図 3 に、誘導加熱調理器における負荷加熱の様子を示す。セラミックのトッププレート下部に配置された磁力線発生コイル（加熱コイルまたはワークコイル）から磁界を発生させ、このワークコイルからの磁力線の変化によって（電磁誘導によって）鍋の底に誘導電流（うず電流）が流れる。このうず電流によるジュール熱によって負荷である鍋が直接発熱する。IH によれば負荷である鍋や釜を直接発熱させることができ、ヒータ耐久上の問題で制約されていた加熱電力の上限を払拭することができる。また、高周波磁界の電力をインバータ（直流から高周波交流を発生させる回路）によって自由自在にコントロールことができ、加熱電力の制御性を飛躍的に向上することができる。このように IH は、急速かつ高効率で制御性に優れ、また環境を害さないクリーンな加熱方法であり、これを応用した代表的な調理家電である IH クッキングヒータ（多口の誘導加熱調理器）は、近年大幅な普及拡大を示しつつある。この IH クッキングヒータの特長は、①火を使わないので炎や赤熱部がなく、安全である。②鍋が直接発熱するので無駄な放熱が

図 2 誘導加熱の原理

Fig. 2. Principle of Induction heating.

図 3 誘導加熱調理器の原理

Fig. 3. The principle of IH cooker.

なく、加熱効率が 90%と高効率。③フラットな調理面で清掃性が良好であり清潔。④ガスのように輻射熱がないので、気密性の高い部屋でも快適である。IH のこのような特長が市場でも大きく受け入れられ、今日の社会的なトレンドに相まって、大きな伸びを示している。

4. 誘導加熱調理器の技術変遷

IH 技術は前述したように多くの特長があるため、工業用には乾燥・溶解・焼入・鍛造などの加熱に古くから利用されてきた。工業用に初めて利用されたのは 1932 年米 TOCCO 社のクランクシャフトの焼き入れ用である^①。調理器に IH を用いる概念はすでに 1800 年代後半の欧米の特許に見られ、国内でも 1925 年に誘導電熱炊具として特許が成立している^②が、その実用化はパワー半導体デバイスが民生レベルに普及し始める 1970 年代まで待たねばならなかった。誘導加熱調理器をはじめて製品として紹介したのは米 WH 社で、1970 年に高周波方式で展示実演している。国内では 1974 年に実用化されたが、当時低周波方式と高周波方式の 2 つの IH 方式が存在した。

低周波方式は磁力発生コイル（加熱コイル）に流す電流

の周波数が商用電源周波数 50 Hz あるいは 60 Hz であるため、高周波方式 (20 kHz 以上) と比べ、パワー半導体デバイスを用いた周波数変換装置 (高周波インバータ) が不要でコスト的に有利という特長がある半面、低周波であるが故に磁気反発力/吸着力に起因する鍋の振動音が発生するという課題があった。実用化された低周波方式の誘導加熱調理器は、この困難な課題を、特殊合板鍋方式と位相励磁方式の 2 つの画期的技術によって解決し⁽³⁾、価格は 9 万 9 千 8 百円と高周波方式 (23 万円) の半分以下であった。しかしながら、この方式は専用の鍋 (上記特殊合板を用いた鍋) が必要で、また調理中は鍋がプレートに吸着して離れないという課題があり、さらに後述のようにパワー半導体デバイスとインバータの進化により高周波方式の価格が徐々に下がっていったため、次第に優位さを失い、1980 年代には市場から姿を消した。

高周波方式誘導加熱調理器の高周波インバータは簡素な回路構成でゼロ電圧ソフトスイッチング (ZVS) またはゼロ電流ソフトスイッチング (ZCS) 動作を行うことができ、

図4 1石共振形インバータ (半共振ファミリー)
Fig. 4. Half-resonant inverter family.

高周波スイッチング動作に対して低損失・低ノイズかつコンパクトでコスト的にも優れる 1 石共振形インバータで実現されてきた。1 石共振形インバータは図4と図5の回路群に集約される⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

図4はコイル、キャパシタといった共振要素が2つで構成されるのでスイッチングデバイスの電圧または電流のいずれかが共振波形、他が非共振波形となる半共振ファミリーである。

図5は共振要素が3つで構成されるので、スイッチング

図5 1石共振形インバータ (全共振ファミリー)
Fig. 5. Full-resonant inverter family.

図6 パワー半導体デバイスと高周波インバータ回路トポロジーの変遷

Fig. 6. Historical review of power semiconductor devices and high-frequency inverter circuit topologies.

図7 1974年の誘導加熱調理器

Fig. 7. IH cooker commercialized for the first time in 1974.

デバイスの電圧・電流とも共振波形となる全共振ファミリーである。全共振形は半共振形より回路部品が1つ多くなるがスイッチング遷移時のデバイス責務を小さくできる、各カテゴリー内の回路群はその基本動作において等価であり、図4と図5に示すスイッチングデバイスの電圧と電流の波形で動作する。

図6は高周波方式誘導加熱調理器の高周波インバータ回路トポロジーとパワー半導体スイッチングデバイスの変遷経過を示している。

1974年～1980年に用いられた初期の1石インバータは、

図8 現在の誘導加熱調理器

Fig. 8. Present IH cooker.

図に示すような電流形インバータであり、工業用の多石フルブリッジインバータに比べれば簡素な回路構成で電力変換を行うことができるが、装置の形状・重量・コストとも応用拡大のためにはまだ十分ではなく、効率も65%とまだ低かった。商用電源は所定の電圧を出力する電圧源であり、これを電流源として利用するために大型のチョークコイルを必要としていた。さらにはパワー半導体スイッチングデバイスとしてはサイリスタを用いていたため制御性に制約条件が多かった。サイリスタは電流をONすることはできるが、流れている電流がゼロになるまではOFFすることができないため、加熱パワーの制御範囲に限界があり、回路トポロジー的には転流動作可能な、図4(B)が採用されていた。パワー半導体のスイッチング損失も大きな回路構成で

あったために損失が大きく、これを冷却するための機構が大型になっていた。これらが装置の大型化や効率の低下を招く原因であった。図7にこれらの回路部品の様子を示す。

その後、1980年代に入って、商用電源をそのまま電圧源として用い、パワー半導体デバイスとして制御性が良好なバイポーラトランジスタを用いて、十分な電力制御範囲を確保した新しい電圧形1石インバータ(図4(a2))が開発された。この高周波インバータは電圧源であることから、それまで必要であった大型のチョークコイルが不要となるなどインバータの簡素化に大いに貢献した。しかしながらデバイスの駆動は電流駆動であり、駆動のための電力や、回路部品が大きいたことが課題であった。そこでこの時代では、駆動電力低減のためダーリントン接続型のデバイスや、回路部品小形化のため、駆動電力を加熱コイルと結合させたピックアップコイルから得る方式などが開発された。

1990年代では、さらに低損失で制御性の良い電圧駆動型のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)をパワー半導体デバイスとして用いることにより、駆動電力が飛躍的に小さくなり、小形、低コストが進展した。またこの小形、低コスト化によって他の電力応用機器への展開が容易となり、1987年にはIH熱源を炊飯器へと応用したIHジャー炊飯器が誕生している。以上の取り組みにより、現在では初期のものに比して装置の形状・重量・コストは約1/7になり、効率も85%に達した。これによって、従来ヒータでは1000Wが限界であった加熱パワーを1400Wまで高めることができ、さらには加熱パワーを任意に制御できるシステムも確立し、従来の調理家電の課題であった高火力と高制御性を実現して電気調理器と電気炊飯器の技術変革に成功した。現在の誘導加熱調理器の筐体内部を図8に示す。

また、近年では200V商用電源を利用してさらなるハイパワー化と高効率化が追求され、2kW~3kWの加熱定格のIHクッキングヒータが登場し、加熱効率も90%まで高められている。このIHクッキングヒータは通常IHバーナ2口、ラジエントヒータ1口(1.2kW程度)、魚焼きグリル(1.5kW程度)で構成される。高周波方式誘導加熱調理器は、前述したように可聴域以上の加熱周波数を用いているが、特にIHクッキングヒータでは負荷(鍋)の種類や加熱電力

の制御によって加熱周波数が増減すると図9のように隣り合うバーナの加熱周波数の差が可聴域に入ると鍋干渉音が発生するという問題がある。そこで周波数一定で電力可変を行うVPCF制御(Variable-Power Constant-Frequency)が可能インバータを開発し、隣り合うバーナの加熱周波数が一致するように制御して鍋干渉音をなくす必要があった。

1990年に実用化されたVPCF制御インバータは、SEPP(Single Ended Push-Pull)構成のハードスイッチングインバータにて、動作周波数は20kHzで一定とし、2個あるパワー半導体デバイスの導通比を変えて加熱出力を制御していた。しかしスイッチング損失とスイッチングノイズ対策のための冷却機構やフィルタ回路が形状やコストを過大にしていた(図10参照)。

そこでソフトスイッチング化を実現するための種々取り組みが行われ、例えばアクティブクランプ形の部分共振インバータ⁽⁶⁾(図11参照)や4石式のフルブリッジインバー

図10 初期のVPCF制御インバータ外観
Fig. 10. Appearance of previously developed VPCF inverter.

図11 アクティブクランプ形部分共振インバータ外観
Fig. 11. Appearance of active clamp edge resonance inverter.

図9 干渉音の発生原理
Fig. 9. Generation of interference sound.

図 12 誘導加熱応用調理家電の変遷
Fig. 12. Changes of IH cookers.

タ, SEPP 構成でロスレススナバコンデンサと直列にスイッチングデバイスを挿入し, アクティブに制御するもの⁽⁷⁾などが開発され, この分野に置いて小形・低コスト化・高性能化(例えば定格電力 2 kW から 3 kW へアップなど)が進んでいる。以上述べた IH 応用調理器の変遷を図 12 に示す。

5. 拡大進化して行く IH 技術

1974 年の実用化当時, 加熱可能な鍋材質は鉄及び磁性ステンレスのみで, 銅やアルミニウムといった非磁性体は加熱不可であり, 当初から加熱対象鍋の拡大が望まれていた。1980 年代半ばに非磁性ステンレスは加熱可能となったが, 市場でのウェイトが高いアルミ鍋などは加熱不可のままであった。しかしながらごく最近(2002 年 11 月)アルミ鍋や銅鍋, 多層ステンレス鍋も加熱可能なオールメタル対応のインバータも開発された⁽⁸⁾。アルミや銅など, 非磁性で抵抗率の低い負荷を加熱する場合, 底面に流れるうず電流に対して経路の電気抵抗が低く, 必要なジュール熱を得ることができなかった。これに対して, 加熱周波数を従来の 20 kHz から 60 kHz と 3 倍の周波数とし, 表皮効果による電流経路の電気抵抗を増加させて, 所定の加熱出力を得ることを可能としている。単純にインバータの動作周波数を増加させたのではインバータのスイッチング損失が大きくなり実用的ではないため, 共振回路の共振周波数をインバータ出力の 3 倍の周波数に設定し, インバータの動作周波数はそのままで 3 次共振電流によって高周波磁界を発生させている。また, 加熱コイルもそのままでは高周波損失が大きくなるため, 従来よりも素線数の大きな細線を撚り合わせたものを用いる工夫をしている。

6. 今後の展望と課題

以上, 述べてきたように, IH 技術は 1980 年代を境に急速に進歩し, 現在に至るまで進化を続け, 全ての金属鍋を

加熱できるまでに至っている。この背景にパワー半導体デバイスの進化(サイリスタ→バイポーラトランジスタ→IGBT)と共に高周波インバータテクノロジーの進化があったことは, 歴史的事実であり, パワー半導体デバイスと高周波インバータはちょうど車の両輪の様な関係であった。IH クッキングヒータの市場は近年, 年率約 150 % の伸びで推移しており, その普及率も約 5 % に達している。これは冒頭に述べた各種のメリットが消費者に受け入れられてきたという事実を示しており, これからの高齢化や高度情報化などの社会トレンドとも合致して, さらなる拡大が見込まれる。さらに普及を図るためには, ①低コスト化, ②さらなるハイパワー化, ③さらなる高効率化などが目指すべき方向と考えられる。

今後の技術課題を考える上で, やはりキーテクノロジーとなるのはパワー半導体デバイスの技術革新と, 新たなソフトスイッチング高周波インバータの技術開発である。例えば図 4, 5 で紹介した高周波インバータ回路のファミリーにおいてその半分は逆阻止構造デバイスであるが, 現在のところこの構成を実現しようとする, IGBT とダイオードを直列に接続する必要があり, 部品点数及び導通損失面で不利である。しかしながら昨今報告されているような逆阻止 IGBT⁽⁹⁾が実用化されれば, 新たな高周波インバータ実現の可能性が一気に 2 倍に増える。これは 1 石式のみならず, 多石のインバータ回路でも同様である。さらにワンチップ双方向パワー半導体デバイスが開発されればダイレクト AC-AC 変換回路も実現でき, 高周波応用分野に大きなインパクトを与えると思われる。また SiC パワー半導体デバイスの出現も近年見逃せない状況である。以上のようにこれからもパワー半導体デバイスと高周波インバータの進化により, IH 技術が発展し, その応用家電機器の性能向上や用途拡大が一段と進んでいくものと思われる。

(平成 15 年 10 月 21 日受付, 平成 16 年 4 月 12 日再受付)

文 献

- (1) 加村正夫:「誘導加熱小特集に寄せて」, 明電時報, No.3, 通巻 134 号, p.22 (1977)
- (2) 特許第 62201 号 (1925)
- (3) 伊藤利朗:「低周波で料理ができるか」, 新電気, Vol.27, No.2, pp.46-50 (1973-2)
- (4) H.Omori and M.Nakaoka: "Generic circuit Topologies and Their Performance Evaluations of Single-Ended Resonant High-Frequency Inverters for Induction-Heated Cooking Appliances", *TIEE Japan*, Vol.117-D, No.2, pp.150-159 (1997-2) (in Japanese)
大森英樹・中岡睦雄:「誘導加熱用 1 石共振形高周波インバータの回路トポロジーと特性評価」, 電学論 D, 117, 2, pp.150-159 (1997-2)
- (5) I.Hirota, H.Omori, and M.Nakaoka: "Practical evaluations of a ZVS-PFM quasi load-resonant high-frequency inverter using a new generation IGBT for an induction-heated cooking appliance", *Int. J. Electorronics*, Vol.80, No.2, pp.329-340 (1996)
- (6) 大森英樹・弘田泉生:「調理器とインバータ技術」, *OHM*, pp.50-56 (1999-9)
- (7) 松尾勝春・滝本 等・鈴木賢司:「ハイパワーIH クッキングヒーター BHP-M46F」, 東芝レビュー, Vol.53, No.8, pp.43-46 (1998)
- (8) 山下秀和:「進化し続ける注目の IH 技術」, *OHM*, pp.36-40 (2003-5)
- (9) 武井 学・小高章弘・藤本 久:「逆阻止 IGBT の適用技術」, 富士時報, Vol.75, No.8, pp.445-448 (2002)

弘 田 泉 生

(正員) 1964 年 9 月 7 日生。1987 年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。同年松下電器産業(株)入社。以来、誘導加熱用高周波インバータとパワー半導体デバイスの応用技術開発を中心とした研究に従事。現在、同社電化住設研究所電子技術グループ主席技師。パワーエレクトロニクス学会の正会員。

山 下 秀 和

(正員) 1955 年 8 月 14 日生。1981 年 3 月神戸大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了, 同年松下電器産業(株)入社。以来、センサ応用システム、パワーエレクトロニクス応用機器の研究に従事。現在、同社電化住設研究所 機構第 2 グループ グループマネージャー。パワーエレクトロニクス学会、電気設備学会、日本太陽エネルギー学会の各正会員。

大 森 英 樹

(正員) 1954 年 5 月 2 日生。1979 年神戸大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年松下電器産業(株)入社。以来、家電分野のパワーエレクトロニクス応用の研究に従事。1994 年オーム技術賞, 2002 年研究功績者表彰文部科学大臣賞。現在、同社電化住設研究所 所長。工学博士。電子情報通信学会, IEEE, パワーエレクトロニクス学会、日本太陽エネルギー学会の各正会員。

中 岡 睦 雄

(正員) 1942 年 1 月 13 日生。1972 年大阪大学大学院工学研究科・博士課程・電気工学専攻・神戸大学工学部・電気電子工学科大学院自然科学研究科を経て、山口大学工学部・電気電子工学科/大学院理工学研究科・電気システム工学専攻・教授。パワーエレクトロニクスとエネルギーエレクトロニクスに関する教育と研究に従事。工学博士, 兵庫科学技術賞, 医科学技術賞, 2001 年 IEE-UK, Premium Paper Award, 2003 年 IEEE-IAS James Melcher prize paper award など受賞。IEEE-Industrial Electronics Japan Chapter の chairman, 電子情報通信学会, 照明学会, IEEE, IEE-UK, IEE-Korea, などの各正会員。