アルミニウム容器誘導加熱用高周波負荷共振形ZVS-PFMインバータの検討

学生員 金 龍柱 (神戸大学) 正員 中岡 睦雄 (山口大学)

High-Frequency ZVS-PFM Resonant Inverter for Aluminium Vessel Induction Heating
Yong Ju Kim, Student Member (Kobe University), Mutsuo Nakaoka, Member (Yamaguchi University)

キーワード: ハーフブリッジインバータ, ゼロ電圧スイッチング, アルミニウム容器誘導加熱, ZVS-PFM制御

1. まえがき

ゼロ電圧(Zero-Voltage Switching: ZVS)、ゼロ電流(Zero-Current Switching: ZCS)モードでスイッチング動作をさせるソフトスイッチング方式高周波インバータは、家電民生応用において積極的に取り入れられ、かなりの実用化がなされている。

本報告では、非磁性体であるが熱伝導率が高いアルミニウム容器を誘導加熱負荷対象とした共振形ZVS-PFMインバータを取り上げ、その検討結果と実験結果について述べている。

2. ハーフブリッジ負荷共振形ZVS-PFMインバータ

現在、家電民生応用で使用されているインバータは1石型インバータが主流となっている。しかし、商用系統が200Vになると耐圧の面で限界を生じる。このため、ハーフブリッジやフルブリッジのトポロジーが必要となるが、今回フルブリッジに比べて低コストな電圧部分共振型ハーフブリッジインバータを取り上げる。図1のインバータは、スイッチング素子にかかる電圧は電源電圧でクランプされるため電圧ストレスの問題がなく、制御においてもPWM、PFMがそれぞれ独立に行える。

そして、スイッチングデバイスに並列に接続されたロスレススナバキャパシタのデッドタイム期間中の部分共振現象により、ターンオフ時の電圧の立ち上がりを滑らかにし電圧、電流の重なりを小さくしスイッチングロスを低減している。さらに、ZVS/ZCSで動作するためEMIノイズなどの低減も期待される。

図2は実験に用いた平板状加熱コイルによるアルミニウム誘導加熱装置を示したもので、電気効率を高めるために加

熱コイルと加熱面の間はできるだけ小さくしている。しかし、加熱コイルを熱的、機械的に保護する必要から比較的硬度の高い断熱材が両者の間に挿入される。コイルの背後に磁束の通路となる鉄心材料を装着することは効率を高めたり、回路を磁束から保護するための有効な手段である。また、実験では断熱材として厚さ3mmのセラミック板を用い、鉄心の材料としてはフェライトを用いている。

誘導加熱時、被加熱物は加熱コイルと磁気結合している

図2 平板状コイルによるアルミニウム誘導加熱の断面図
Fig. 2. Cross section of aluminium induction heating depending on plate formed coil

ので図3のような誘導加熱系の等価回路と考えることができる。この回路方程式は次のようになる。

$$V = (R_0 + j\omega L_0)\dot{I} - j\omega M\dot{I}_s \quad \dots\dots(1)$$

$$-j\omega M\dot{I} + (R_s + j\omega L_s)\dot{I}_s = 0, \quad \omega = 2\pi f$$

ここで、 $\tau = L_s / R_s$, $k = M / \sqrt{L_0 L_s}$, $A = 1/\omega^2$ とおくと電源Vからみたインピーダンス Z_i は(2)式となる。

$$Z_i = \frac{V}{I} = R_0 + \frac{k^2 \tau}{A + \tau^2} L_0 + j\omega L_0 \left(1 - \frac{k^2 \tau^2}{A + \tau^2} \right) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 $Z_i = R_c + j\omega L_c$ とおくと図3(b)より、入力電力 PI と被加熱物で消費される電力 P_o は、

図3 誘導加熱コイル系の等価回路

Fig.3. Equivalent circuit of induction-heating coil-coupled system

図1 電圧部分共振型 ハーフブリッジインバータ

Fig.1. Voltage quasi-resonant half-bridge inverter

$$P_i = R_c \times I^2 \dots (3), \quad P_o = (R_c - R_0) \times I^2 \dots (4)$$

従って、誘導加熱による加熱コイルの加熱効率 η は(5)式となる。

$$\eta = P_o / P_i = (R_c - R_0) / R_c \dots (5)$$

アルミニウム容器の抵抗値が未知である場合も加熱コイル自身の抵抗値 R_0 と、アルミニウム容器が磁気結合した状態の加熱コイルの抵抗値 R_c を測定することにより加熱効率を算出することができる。

表1. 鉄とアルミニウムの電気/磁気的性質

Table 1. Physical disposition of iron and aluminium

	鉄	アルミニウム
抵抗率: ρ [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	8.71	2.41
比透磁率: μ	300	1

表1は鉄とアルミニウムの電気/磁気的な性質を示す。ここで、誘導加熱によって被加熱物で消費される電力は、

$$P = K \sqrt{\mu \rho f} \times N \cdot I \dots (6)$$

但し、 K : 定数 (結合係数と同一), f : 周波数[Hz]

N : 加熱コイルの巻き数[T], I : 加熱コイルに流れる電流[A]

となる。(6)式によりアルミニウムが鉄の1/3しか電力を発生しないことがわかる(周波数が83kHzの場合)。以上のことから、実際のアルミニウム加熱の場合に加熱効率を高める方法を検討して見ると次のようになる。

■可能な限り細いリッツ線で構成された平面加熱コイルを使う: 細くするほどコイルの銅損が減る。

■高周波数化: 実際の応用を考えてMOSFETを用いて実験回路を構成する。

■加熱コイルの渦電流 I を増やす: しかし、コイルの巻き数を増加させるとコイルの高抵抗化により損失が大きくなることに注意する必要がある。

3. 実験結果と評価

加熱コイルは高い周波数の電流が流れるため、一束40本のF種リッツ線(1本の直径0.05mm)30束を袋編みにし、ターン数44、内径55mm、外径210mmの平面構造とした。また、0.07mmのリッツ線を0.05mmの場合と同じ構造でターン数50、内径45mm、外径145mmの平面コイルを試作し実験を行った。

図5はアルミニウム負荷時の特性を示したもので、図5(a)は加熱コイルと平面アルミニウム容器(アルミ容器底面の直径: 210mm)とのギャップを変えた時の周波数に対する結合係数 K の特性を示す。ここで、ギャップ0.5mmはセラミックススペーサーなしでテフロンシートの厚さである。

図5(b)はリッツ線の直径に対する交流抵抗で0.12mmと0.07mm、0.05mmのリッツ線のインバータ周波数に対する抵抗値を示す。図6は直径0.07mmと0.05mmのリッツ線を用いた平面コイル使用時の周波数と加熱効率との関係を示す。このときアルミニウム容器と平面コイルの間は3mmである。図6(a), (b)を比べて見ると、細いリッツ線を使うことによって効率が改善されていることがわかる。

図7はMOSFETを用いて実験を行った時の波形で、負荷条件はアルミ鍋に水を1ℓ、入力電力1120W(入力電圧: 140V、電流: 8A)である。

図5 誘導加熱コイル特性
Fig. 5. Characteristics of induction heating coil

図6 周波数に対する効率の変化
Fig. 6. Experimental and estimated efficiency versus resonant frequency

図7 高周波インバータの出力電圧、電流波形
Fig. 7. Output voltage & current waveforms of high-frequency inverter

4. まとめ

非磁性体で抵抗率の低いアルミニウム容器を被加熱物とした場合の誘導加熱用ハーフブリッジZVSインバータを検討し、約73%

の高効率を実現した。これにより、アルミニウムを被加熱物とした誘導加熱応用の実現可能性は高いものと思われる。

(平成7年9月22日受付)

文献

- (1) 高橋監修: "高周波の基礎と応用", 東京電機大学出版局, 平成2年10月。
- (2) 荻原 弘之, 長井 聡, 中岡 睦雄: "誘導加熱用瞬時電流ベクトル合成高周波共振インバータ", 電気学会半導体電力変換研究会, SPC-91-18, 1991年6月。

金 龍 柱 (学生員) 1960年3月19日生。1988年建国大学大学院(韓国)電気工学専攻修士課程修了。1991年同大学大学院電気工学科博士課程2年自退。神戸大学大学院自然科学研究科生産科学専攻在籍中。

中岡 睦雄 (正員) (電気論D, Vol. 115, No. 9, p. 1107, 平7-8. 参照)