複合共振 ZVS 高周波インバータの電流振幅比

正員 畑中 義博* 正員 木船 弘康*

Current Amplitude Ratio of Novel Multi-Resonant ZVS High Frequency Inverter

Yoshihiro Hatanaka*, Member, Hiroyasu Kifune*, Member

Novel multi-resonant ZVS (Zero Voltage Switching) high frequency inverter applied for high frequency induction heating is developed. The current amplitude ratio of switch current and output current in the inverter is theoretically clarified. The effectiveness of the inverter is verified by experiments.

キーワード：複合共振，高周波誘導加熱，ZVS，高周波インバータ

Keywords: multi-resonant, high frequency induction heating, zero voltage switching, high frequency inverter

1. はじめに

近年，非磁性体ステンレスや銅，アルミなどの誘導加熱のニーズが高まっている。非磁性体金属の誘導加熱では，透磁率が小さいのを補うために負荷に供給する高周波電流の動作周波数（出力周波数 f_o ）を高くするとともに，抵抗率の小さい負荷に対しては，大きな電流を供給する必要がある。しかし，高周波大電流動作では，電力半導体スイッチにおけるスイッチング損失だけでなくオン抵抗による導通損失をいかに低減するかが重要となる。そのため，マッチングトランスを用いて，スイッチ電流を抑制しながら負荷大電流動作を実現する方法もあるが，トランスの冷却システムや設置スペースの観点からは，トランスレスが望ましい。本研究では，コンデンサ 2 組のみと負荷との組み合わせによる複合共振を利用して，トランスレスでスイッチ電流を抑制しながら，負荷の大電流動作を実現するとともに，ZVS (Zero Voltage Switching) 動作が可能な回路を開発し，実験を通してその特長を評価・検討したので報告する。

2. 複合共振 ZVS 高周波インバータ

図 1 に SEPP (Single Ended Push Pull) 形複合共振 ZVS 高周波インバータの主回路構成を示す。Lo-Ro 直列接続回路は誘導加熱負荷の等価回路を表し，Cs および Cp は複合共振用のキャパシタンスを示す。図 2 に主回路各スイッチング動作モードと動作波形を示す。ここで，各スイッチング動作モードは

モード a；D1 導通モード

図 1 複合共振 ZVS 高周波インバータ

Fig. 1. Novel multi-resonant ZVS high frequency inverter.

図 2 スイッチング動作モードと動作波形

Fig. 2. Switching operation modes and output waveforms.

* 東京海洋大学海洋工学部海洋電子機械工学科
〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6
Department of Marine Electronics and Mechanical Engineering,
Faculty of Marine Technology, Tokyo University of Marine Science
and Technology
2-1-6, Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8533

- モード b ; S1 導通モード
- モード c ; 休止モード (全スイッチオフモード)
- モード d ; D2 導通モード
- モード e ; S2 導通モード
- モード f ; 休止モード (全スイッチオフモード)

から構成され、定常状態ではモード c、および、モード f の休止モードで、主スイッチ S1, S2 は ZVS 動作をしながら、モード a からモード f を周期的に繰り返す。

複合共振 ZVS 高周波インバータの最大の特長は、モード b、および、モード e の主スイッチ導通モードにおいて下式より導かれる。すなわち、たとえばモード b の S1 導通モードにおいて

$$i_{s1} = i_{cs} = C_s \frac{dv_{Cs}}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

$$i_o = i_{cs} - i_{cp} = C_s \frac{dv_{Cs}}{dt} - C_p \frac{dv_{Cp}}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dv_{Cs}}{dt} = -\frac{dv_{Cp}}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{i_o}{i_{s1}} = 1 + \frac{C_p}{C_s} \dots\dots\dots (4)$$

(4) 式より、出力電流 i_o と i_{s1} の比がキャパシタンス C_p と C_s の比によって自在に決められることがわかる。従って、ZVS 動作が可能な範囲で C_p の値を C_s に比べて大きく設計することにより、スイッチ電流の振幅を抑制しながら負荷電流の大振幅動作が可能となり、スイッチの導通損失を低減することができる。

3. 実験結果

図 3 に、模擬負荷 $L_o = 59\mu H$, $R_o = 1.24\Omega$, $C_s = C_p = 0.0305\mu F$, 入力直流電圧 $E_d = 270V$, 出力周波数 $f_o = 86.2kHz$, 出力電力 $1kW$ での実験動作波形を示す。図 3 で C_s の電流 i_{cs} が、突入電流と配線インダクタンス成分の影響で振動しているが、ほぼ出力電流 i_o の振幅の 1/2 となっており、 $C_s = C_p$ において (4) 式を裏付けている。図 4 は図 3 と同一回路定数におけるシミュレーション動作波形で、 i_{cs} の振幅は、 i_o の振幅の 1/2 となっている。図 5 は、突入電流の影響を配線のインダクタンス成分として $0.2\mu H$, 抵抗成分として 0.1Ω を配慮し、 C_s に直列に接続したときのシミュレーション動作波形で、図 3 の実験波形の動作を裏付けている。入出力電力の比としての電力変換効率は 98% であり、高周波高効率動作を実現している。

4. おわりに

本文では、トランスの巻き数比に匹敵する複合共振を利用したキャパシタンス比により、スイッチ電流の振幅を抑制し、負荷大電流を可能とする複合共振 ZVS 高周波インバータについて報告した。今後は、銅、アルミ鍋の誘導加熱が可能な高出力高周波電源の実用化を目指したい。

(平成 20 年 5 月 30 日受付, 平成 20 年 6 月 13 日再受付)

20A/div, 100V/div, 2.5μs/div

図 3 実験動作波形

Fig. 3. Experimental waveforms.

20A/div, 5μs/div

図 4 理論動作波形

Fig. 4. Theoretical waveforms.

20A/div, 5μs/div

図 5 理論動作波形 (配線のインダクタンス成分 $L_s = 0.2\mu H$, 抵抗成分 $R_s = 0.1\Omega$ 考慮)

Fig. 5. Theoretical waveforms considered line inductance and resistance.

文 献

- (1) A. Terasima, H. Kifune, and Y. Hatanaka: "Multi-Resonant ZVS High Frequency Inverter for Generation of Superheated Steam", Proc. of JIASC2007, 1-92, pp.1-503-504 (2007)
- (2) Y. Hatanaka, H. Kifune, and T. Shimada: "A Novel ZCS High Frequency Inverter with Complex Resonance and Design Procedure for High Amplitude of Output Current", Conf. Rec. IEEE PEDS 2001-INDONESIA, pp.443-447 (2001)