

# 비자성체 용기를 가열할 수 있는 유도 가열용 직렬 공진형 컨버터의 설계

정시훈, 박화평, 정지훈  
울산과학기술원 (유니스트)

## Design Methodology of Series Resonant Converter for Induction Heating of Non-ferromagnetic Pots

Sihoon Jeong, Hwapyeong Park, and Jee Hoon Jung  
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

### ABSTRACT

유도 가열 (Induction Heating; IH) 기기는 빠른 가열 속도, 안전성, 청결성 등의 장점으로 산업계와 가정에서 널리 사용되고 있다. 하지만 기존 IH 기기는 낮은 저항을 갖는 비자성체 용기를 가열할 때 1차측 스위치에 높은 전류가 유도됨으로써 스위칭 손실과 전도 손실이 증가하고 스위치 정격 전류량을 초과하는 문제가 발생하였다. 본 논문에서는 용기 재질에 따른 임피던스 특성을 분석하여 비자성체 용기를 가열하기 위한 적절한 유도 가열용 직렬 공진형 컨버터의 새로운 스위칭 변조 방식을 제안한다. 2 kW의 정격 전력을 가지는 유도 가열용 컨버터의 시작품을 사용하여 설계 방법론과 스위칭 변조 방식의 타당성과 성능을 검증하고자 한다.

### 1. 서론

최근 각광 받는 유도 가열 Cooktop은 빠른 가열 속도, 안전성, 청결성 등의 장점이 있지만, 자성체 재질의 용기를 사용하여야 하는 한계가 있었다. 그림 1은 용기저항에 따른 공진전류를 보여준다. 그림 1과 같이, 알루미늄 용기와 같은 비자성체 재질의 용기는 낮은 저항을 가지고 있어 높은 스위치 전류를 유도하는 문제가 발생하였다. 따라서 비자성체 재질의 용기를 사용할 수 없었다. 선행 연구에서는 3고조파 성분을 통과시키는 공진탱크를 설계함으로써 스위칭 주파수의 3배 높은 공진전류를 워킹코일에 인가하였다. 그림 2는 자성체 재질 SUS304 18 10, 8과 알루미늄 용기의 주파수 따른 용기 유효저항을 나타낸다. 그림 2와 같이, 주파수에 비례하여 용기의 유효저항이 증가함을 이용하여 비자성체 용기의 저항을 증가시켰다. 그러나 3고조파 방식은 기본파 성분의 손실로 인해 전압이득이 1/3배로 감소하기 때문에 기존의 유도 가열 컨버터 구조에서 충분한 전력을 용기에 전달할 수 없다. 따라서, 3고조파 방식으로 비자성체 용기를 가열할 때 전압이득 보상을 위해 입력단 PFC가 추가됨으로써 비용이 증가하는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 입력단 PFC 추가 없이 비자성체와 자성체 용기를 단일 코일에서 모두 가열할 수 있는 유도 가열용 컨버터 설계 방법과 스위칭 변조방식을 제안한다. 제안하는 유도 가열용 컨버터는 입력단 전압이득과 동작주파수를 용기 재질에 따라 제어하는 3가지 동작 모드로 구성된다. 각 모드의 동작 원리를 이론적으로 분석하고 2 kW 시작품 시뮬레이션 결과를 통하여 타당성을 검증하고자 한다.

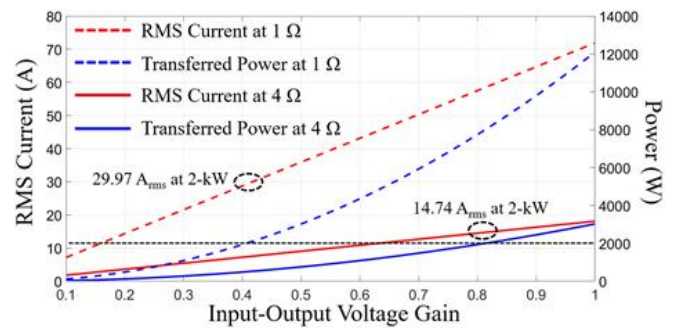


그림 1 용기 저항에 따른 RMS 공진전류  
Fig. 1 RMS current according to the pot resistance.

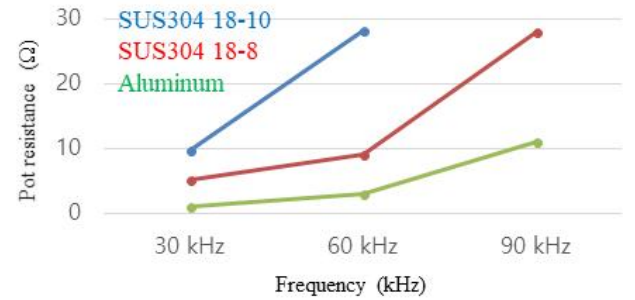


그림 2 주파수에 따른 용기 재질별 용기 저항  
Fig. 2 Pot resistance according to operating frequency

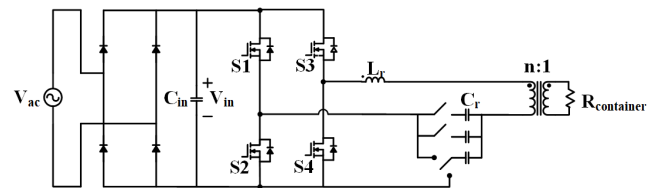


그림 3 제안하는 유도 가열 공진형 컨버터 회로도  
Fig. 3 Circuit diagram of the proposed series resonant converter

### 2. 부하 적응형 유도 가열 공진형 컨버터

그림 3은 제안하는 부하 적응형 유도 가열 공진형 컨버터를 나타낸다. 제안하는 유도 가열 공진형 컨버터는 풀 브릿지 구조 및 공진 캐패시터 네트워크를 가지고 있다. 각 공진 캐패시터는 릴레이로 연결되어 용기재질에 따라 선택적으로 제어된다. 본 문단에서는 각 모드의 동작 원리가 분석된다.

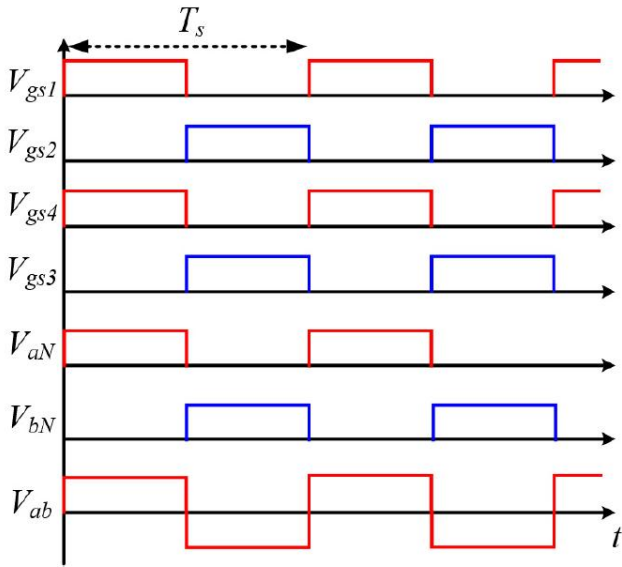


그림 4 풀 브릿지 모드 동작 파형  
Fig. 4 Operational waveforms of full-bridge mode

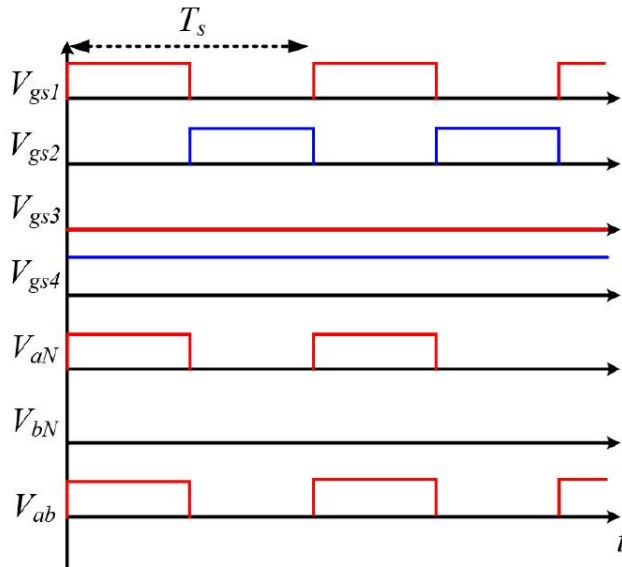


그림 5 하프 브릿지 모드 동작 파형  
Fig. 5 Operational waveforms of half-bridge mode

## 2.1 풀 브릿지 모드 및 하프 브릿지 모드

그림 5는 제안하는 유도 가열 컨버터의 풀 브릿지 모드 동작파형을 보여준다. 풀 브릿지 모드는 높은 저항을 갖는 용기를 가열하기 위한 모드로써 자성체 용기가 식별되었을 때 구동된다.

$$P_{full} = \frac{V_{in}^2}{R_{pot,1f}} \quad (1)$$

식 (1)은 풀 브릿지 모드에서 전달할 수 있는 최대 전력을 나타낸다. 여기서  $P_{full}$ 은 풀 브릿지 모드의 최대 전력,  $V_{in}$ 은 입력 정류 전압,  $R_{pot,1f}$ 는 기본파 주파수에서 측정된 용기 저항을 나타낸다.

그림 5는 제안하는 유도 가열 컨버터의 하프 브릿지 모드 동작 파형을 보여준다. 하프 브릿지 모드는 자성체 용기 중 비교적 낮은 저항을 갖는 용기가 식별되었을 때 구동된다.

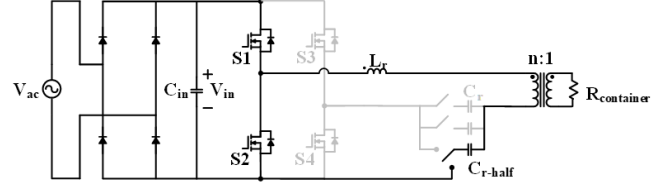


그림 6 하프 브릿지 모드 회로도  
Fig. 6 Circuit diagram of the half-bridge mode

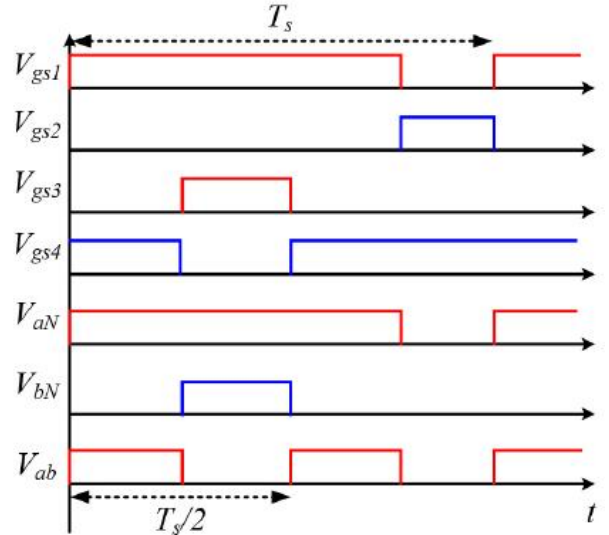


그림 7 프리퀀시 더블러 모드 동작 파형  
Fig. 7 Operational waveforms of frequency doubler mode

$$P_{half} = \frac{V_{in}^2}{4 \times R_{pot,1f}} \quad (2)$$

식 (2)은 하프 브릿지 모드에서 전달할 수 있는 최대 전력을 나타낸다. 여기서  $P_{half}$ 은 하프 브릿지 모드의 최대 전력,  $V_{in}$ 은 입력 정류 전압,  $R_{pot,1f}$ 는 기본파 주파수에서 측정된 용기 저항을 나타낸다. 하프 브릿지 모드에서 전압이득은 풀 브릿지 모드 대비 1/2배로 감소하여 더 낮은 저항을 갖는 용기 가열에 적합하다. 제안하는 유도 가열 컨버터에서 하프 브릿지 모드로 구동하기 위한 회로도는 그림 6과 같다. 풀 브릿지와 공진 캐패시터를 공유하는 하프 브릿지 모드에서는 스위치 4편의 전도 손실을 줄이기 위하여 전도 경로를 변경하는 Single Pole Double Throw(SPDT) 릴레이가 사용되었다.

## 2.2 프리퀀시 더블러 모드

프리퀀시 더블러 모드는 워킹 코일 단에서 스위칭 주파수보다 2배 높은 주파수의 전류를 유도한다. 따라서 용기의 유효저항은 2배 높은 주파수에서 얻어지므로 기본파 동작 시 보다 더 높은 유효저항을 갖는다.

$$P_{double} = \frac{V_{in}^2}{4 \times R_{pot,2f}} \quad (3)$$

식 (3)은 프리퀀시 더블러 모드에서 전달할 수 있는 최대 전력을 나타낸다. 여기서  $P_{double}$ 은 프리퀀시 더블러 모드의 최대 전력,  $V_{in}$ 은 입력 정류 전압,  $R_{pot,2f}$ 는 2배 스위칭 주파수에서 측정된 용기 저항을 나타낸다. 제안하는 유도 가열 컨버터의 프리퀀시 더블러 모드는 기본파 성분을 제거하지 않으

므로 기존 하프 브릿지 유도 가열컨버터의 전압이득을 유지할 수 있다. 따라서 입력단 전압 이득 보상을 위한 PFC 없이 비자성체 용기를 가열할 수 있다.

### 2.3 시뮬레이션 결과

표 1 제안하는 유도 가열 컨버터의 설계 사항  
Table 1 Design specification of the proposed IH converter

설계 사항	설계치
Input Voltage	220
Resonant frequency (SUS304 18-10)	25 kHz
Resonant frequency (SUS304 18-8)	25 kHz
Resonant frequency (Aluminum)	50 kHz
Pot resistance (SUS304 18-10)	9.5 $\Omega$ at 25 kHz
Pot resistance (SUS304 18-8)	3.1 $\Omega$ at 25 kHz
Pot resistance (Aluminum)	1.8 $\Omega$ at 50 kHz
Resonant Capacitance (SUS304 18-10)	160 $\mu$ H
Resonant Capacitance (SUS304 18-8)	140 $\mu$ H
Resonant Capacitance (Aluminum)	130 $\mu$ H

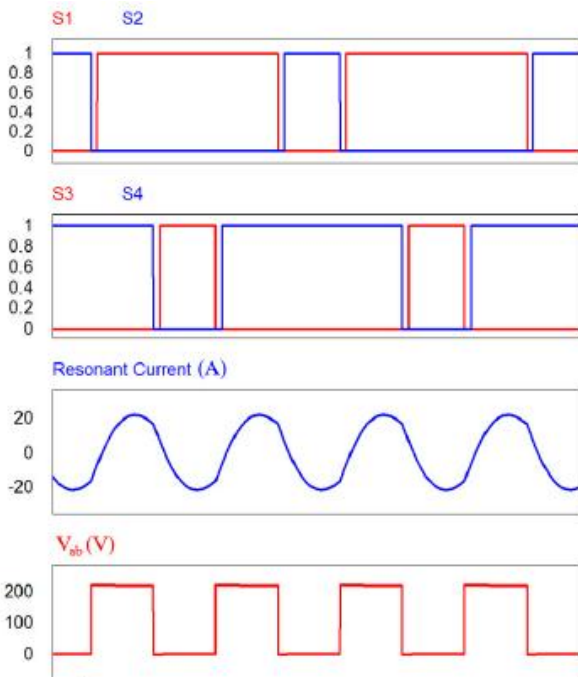


그림 8 시뮬레이션 결과 (프리퀀시 더블러 모드)  
Fig. 8 Simulation results of frequency doubler mode

제안하는 유도 가열 공진형 컨버터의 설계 사양은 표 1과 같다. 프리퀀시 더블러에서 동작하는 Aluminum 용기는 스위칭 주파수의 2배인 50 kHz 측정값으로 선정되었다. 그림 8은 비자성체 용기 가열을 위한 프리퀀시 더블러 모드의 동작 시뮬레이션 파형을 나타낸다.

표 2 스위치 전류 시뮬레이션 결과  
Table 2 Experimental results of switch current

동작 모드	스위칭 주파수	코일 동작 주파수	스위치 전류(RMS)
풀 브릿지	28 kHz	28 kHz	15.2 A
하프 브릿지	26 kHz	26 kHz	26.3 A
프리퀀시 더블러	26 kHz	52 kHz	26.5 A

표 2는 제안하는 유도 가열 공진형 컨버터의 스위치 전류 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 프리퀀시 더블러 모드인 경우 스위칭 주파수는 기본과 동작과 동일한 26 kHz이지만 코일단 동작주파수는 52 kHz에서 동작한다. 알루미늄 가열 시 구동 모드인 프리퀀시 더블러에서 스위치 전류는 기존 유도 가열 컨버터의 하프브릿지 동작시 같은 스위치 정격으로 구동가능함을 확인할 수 있다. 따라서, 본 시뮬레이션 결과를 통해 동일 코일 조건에서 비자성체 용기와 자성체 용기를 각 모드에서 입력 전압이득과 코일 동작 주파수를 제어함으로써 가열가능함을 검증하였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 비자성체 용기와 자성체 용기를 입력전압 보상없이 단일 버너에서 가열할 수 있는 유도 가열 공진형 컨버터를 제안했다. 기존의 유도 가열 컨버터에서는 낮은 저항을 갖는 비자성체 용기 가열 시 높은 스위치 전류가 유도되어 단일 버너에서 높은 저항을 갖는 자성체 용기와 동시에 가열하지 못하는 문제점이 있었다. 제안하는 유도 가열 컨버터에서는 풀 브릿지 모드와 하프 브릿지 모드는 입력 전압 이득을 용기 재질에 대응하여 제어하여 자성체 용기를 가열하였다. 프리퀀시 더블러 모드는 스위칭 주파수의 2배 동작 주파수의 전류를 워킹 코일에 인가하여 비자성체 용기의 저항을 증가시켰다. 본 논문에서는 제안하는 유도 가열 공진형 컨버터의 동작 원리를 분석하였고 PSIM 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2017년 동서발전 연구비(해수전지를 이용한 파일럿급 ESS 설비구축 원천기술개발 및 시험)에 의하여 연구되었음

### 참 고 문 헌

[1] H. S. et al, "Latest practical developments of triplex series load resonant frequency operated high frequency inverter for induction heated low resistivity metallic appliances in consumer built in cooktops," in in IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), vol. 1, 2010, pp. 1825-1832

[2] O. Lucia, J. M. Burdio, I. Millan, J. Acero, and D. Puyal, "Load adaptive control algorithm of Half Bridge series resonant inverter for domestic induction heating," IEEE Trans. Industrial Electronics., vol. 56, no. 8, pp. 3106-3116, August 2009.