

# 비자성체 유도 가열을 위한 HB 공진형 인버터의 고조파 운전방법 분석

안정훈, 유승희, 김옥진, 이병국\*  
 성균관대학교 정보통신공학부

## Analysis of Half-Bridge SRC Inverters with Harmonic Operation for Non-Ferromagnetic Induction Heating

Jung Hoon Ahn, Seung Hee Ryu, Og Jin Kim, and Byoung Kuk Lee\*  
 College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문은 비자성체 유도 가열을 위한 Half Bridge 공진형 인버터의 고조파 운전방법을 분석한다. 비자성체 용기를 유도 가열하기 위해서는 자성체 용기보다 높은 주파수의 공진전류를 필요로 하며, 반도체 소자의 선정 및 손실에 어려움을 야기한다. 이 문제를 극복하기 위하여 스위칭 주파수보다 높은 공진전류를 운용하는 고조파 운전방법을 적용하고, 분석한다.

### 1. 서론

최근 인기를 끌고 있는 유도 가열 조리기는 가스 가열기 보다 안전하고 친환경적이며 용기를 직접 발열 시키므로 전체 시스템의 효율이 높아 소형 및 경량화가 용이하다. 상용화되어 있는 유도 가열 조리기는 대부분 자성체 소재의 전용 용기를 필요로 하는 반면에, 흔히 가정에서 사용되고 있는 조리 용기는 알루미늄, 구리, 스테인리스스틸 등 비자성체 용기가 주류를 이룬다. 기존 용기의 인프라를 활용하기 위해서는 재질에 상관없이 모든 용기를 가열할 수 있는 유도 가열방법에 대한 연구가 필수적이다. 하지만, 비자성체 용기의 비저항과 투자율은 자성체 용기에 비해 상당히 낮아 제어 및 구현에 어려움이 있다[1].

본 논문에서는 하나의 HB 직렬공진형 인버터를 통하여 모든 재질의 용기를 유도 가열 하는 것을 목표로 일련의 연구를 수행하였다. 먼저, 용기의 종류에 따른 등가부하를 수식적으로 모델링하였다. 상대적으로 높은 주파수의 공진 전류를 필요로 하는 비자성체 용기의 가열을 위하여 동일한 스위칭 주파수로 더 높은 주파수의 공진전류를 운용하는 방법인 고조파 운전을 도입하고, 이를 위한 맞춤형 공진 네트워크 설계 과정을 밝혔다. 전체 과정은 이론적 분석과 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

### 2. 모든 금속성 용기를 위한 유도 가열기

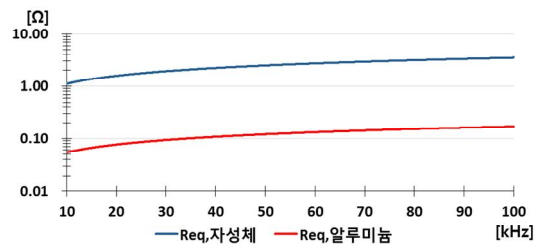
#### 2.1 용기의 재질에 따른 유도 가열기의 부하 모델링

HB 공진형 인버터의 부하는 용기와 유도 코일로 이루어지며 용기의 재질 뿐 아니라 주파수에 따라 변한다. 공진 네트워크의 설계와 출력전력의 제어를 위해서는 정확한 부하 모델링이 필요하다. 유도 코일의 권선수가 20턴 이고, 내경과 외경이 각각 2.3cm, 8.2cm이며, 코일과 용기간의 거리가 5mm인 유도 가열기를 모의하고, Maxwell's Equation을 이용하여 유도 가열

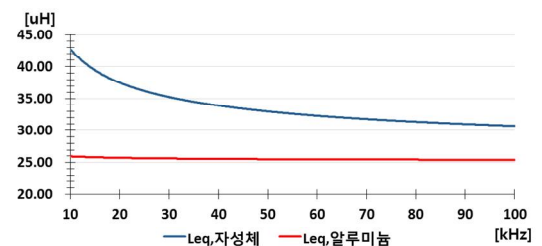
기 부하를 계산하였다. 해당 조건에서 주파수에 따른 등가 임피던스의 변화는 표 1의 수식을 따르며, 그림 1과 같다.

표 1 유도 가열기의 부하  
 Table 1 Parameters of LLC resonant converter

자성체 용기	$3.95 \times 10^{-5} \sqrt{f} + 1.102 \times 10^{-2} \sqrt{f} + j(1.972 \times 10^{-5} - \frac{1.753}{\sqrt{f}} \times 10^{-3})$
알루미늄 용기 (비자성체)	$3.95 \times 10^{-5} \sqrt{f} + 4.989 \times 10^{-4} \sqrt{f} + j(1.972 \times 10^{-5} - \frac{7.941}{\sqrt{f}} \times 10^{-5})$



(a) 등가 저항



(b) 등가 인덕턴스

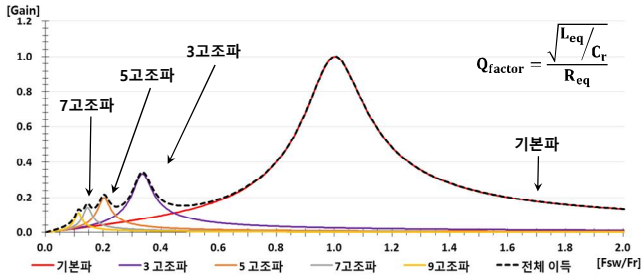
그림 1. 유도 가열기의 부하 모델링.

Fig. 1. Load modelling of induction cooker.

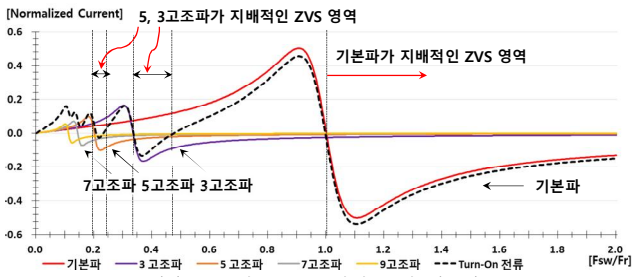
이 결과를 통하여 비자성체 용기가 더 낮은 등가부하저항과 높은 Q Factor의 영향으로 주 운전 부하 영역(0.5kW 3kW)에서의 역률이 상당히 낮음을 추론 할 수 있다. 또한, 높아진 공진 주파수와 부하 전류는 전체 시스템의 효율을 떨어뜨린다.

#### 2.2 비자성체 유도 가열을 위한 고조파 운전

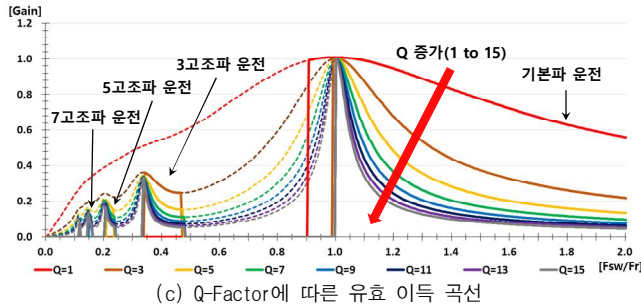
2.1절에서 논의된 유도 가열기의 부하특성을 고려하면, 기본 파만을 설계요소로 갖는 기존의 방식으로는 비자성체 용기의 가열에 한계가 있다. 따라서, 모든 고조파 성분을 고려하여 공진네트워크를 해석하고 선택적으로 이용하는 방법을 제시한다.



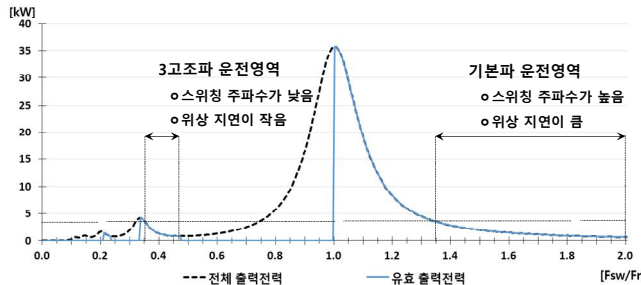
(a) 고조파 성분을 고려한 이득 곡선(Q=5)



(b) 스위치 Turn-On시점의 전류(Q=5)



(c) Q-Factor에 따른 유효 이득 곡선



(d) 유효 출력 전력 곡선(재질=Al, Req=0.3Ω, Q=5, Vin=230V)  
그림 2. 고조파 성분을 고려한 공진 네트워크 특성.

Fig. 2. Characteristics of resonant network considering harmonics.

그림 2(a)의 전체 이득곡선은 주파수 구간별로 지배적으로 기여하는 공진전류의 주파수(기본파, 3고조파 등)에 따라 복수의 극점이 존재함을 보여준다. 또한 식 (1)과 그림 2(b)를 통해 표현되는 Turn On 시점의 공진 전류의 극성을 통하여 공진주파수 아래에서도 ZVS 동작 하는 구간(음전류 구간)을 얻을 수 있다. 그림 2(c)는 Q Factor의 변화와 ZVS 동작하는 유효 이득곡선(점선 대비 실선)을 나타낸다. Q Factor가 높을수록 고조파 운전에 유리하지만 동일 주파수 변화에 대한 출력전력의 변화가 급해지는 단점을 갖는다.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{-Q \left( \frac{(2n-1)f_{sw}}{f_r} - \frac{f_r}{(2n-1)f_{sw}} \right)}{\sqrt{1+Q^2 \left( \frac{(2n-1)f_{sw}}{f_r} - \frac{f_r}{(2n-1)f_{sw}} \right)^2}} \times \text{Gain} \left( \frac{(2n-1)f_{sw}}{f_r} \right) \quad (1)$$

그림 2(d)는 비자성체 용기 (알루미늄)을 대상으로 모의한 출력 전력 곡선을 보여준다. 기본파 운전과 대비하여 3고조파 운전이 무효전력과 스위칭 손실이 작아 비자성체 용기를 위한 유도 가열에 적합함을 보여준다.

그림 3은 유도 가열기의 등가회로이며, 앞선 논의의 결과를 반영하여 자성체용기는 기본파운전을 하고, 비자성체 용기는 고조파운전을 하도록 공진 커패시터를 200nF로 설계하였다. 그림 4의 시뮬레이션 결과로 설계과정의 타당성을 검증하였다.

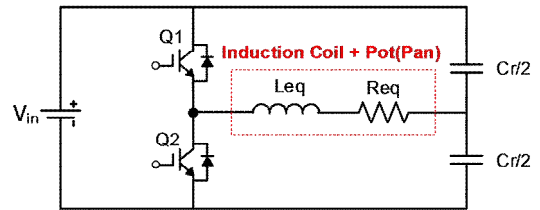
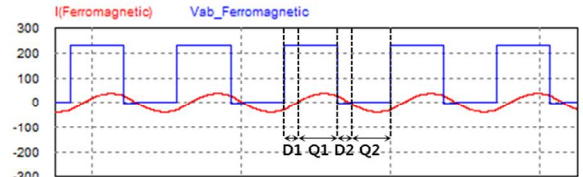
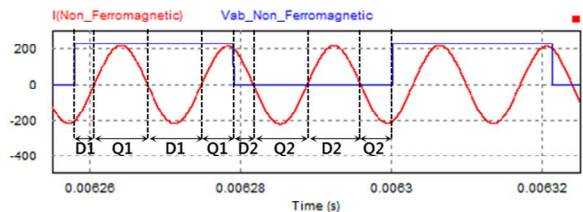


그림 3. HB 직렬 공진형 유도 가열기 등가 회로.

Fig. 3. Equivalent circuit of HB series resonant induction cooker.



(a) 자성체 유도 가열(Fsw=70kHz, Fr=64kHz, 기본파)



(b) 비자성체 유도 가열(AI, Fsw=24kHz, Fr=70kHz, 3고조파)

그림 4. 유도 가열기 시뮬레이션 파형(Po=2kW, Cr=200nF).

Fig. 4. Simulation waveforms of induction cooker.

### 3. 결론

본 논문에서는 유도 가열기의 부하 수식 모델을 용기의 종류에 따라 제시하고, 고조파 운전방법을 분석하여 공진 네트워크를 설계하는 방법을 기술하였다. 이론적 분석과 시뮬레이션 결과를 통하여 다양한 용기의 재질에 대응하여 제어방식을 달리 가져감으로써 하나의 토폴로지로 다양한 용기재질을 유도 가열하는 방법을 제시하였다.

본 연구는 2010년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124010203300)입니다.

### 참고 문헌

- [1] I. Millan, J.M Burdio, "P-Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all metal domestic induction heating", *IET Power Electron.*, 2011, Vol. 4, No. 5, pp. 587-592.
- [2] H Ogiwara, M. Nakaoka, "ZCS high Frequency inverter using SIT for induction heating applications", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 150, No. 2, pp. 185-192, 2003.