

## 다부하를 갖는 이중 하프 브릿지 유도가열 조리기

정용채<sup>o</sup>, 전효식, 한성진, 노희석

LG전자 리빙시스템연구소

### Dual Half Bridge Induction Heating Cooker With Multiple Loads

Jung Yong-Chae, Jeon Hyo-Sik, Han Sung-Jin, Roh Hee-Succ  
LG Electronics Inc. Living System Research Laboratory

**Abstract** - A new dual half bridge induction heating cooker circuit with multiple loads is proposed for reducing the acoustics noise which is caused by the difference between operating frequencies of adjacent loads. This circuit has minimum loss due to the zero voltage switching characteristic. According to the mode analysis of the proposed circuit, we explain the operation of the dual half bridge induction heating cooker circuit. The proto-type circuit with 2.8kW power consumption is built and tested to verify the operation of the proposed circuit.

#### 1. 서론

유도가열(Induction Heating)은 주로 산업계에서 주조, 열처리, 용접, 표면처리 등에 많이 이용되고 있다. 1970년대 중반부터 이러한 유도가열의 원리를 가전제품에 응용하기 시작하면서 유도가열 조리기(Induction Heating Cooker)에 대한 연구들이 많이 진행되어 왔다.[1-6]

유도가열은 1831년 패러데이에 의해서 발견된 전자기 유도현상을 기초로 하고 있다. 패러데이의 실험은 코일내에서 자석을 이동시키면 폐회로를 형성하는 코일에 유도전류가 발생한다는 것인데, 유도가열의 원리는 자석대신 코일을 만들어 교류전류를 흘려주면 교류자속이 발생하고 이 자속과 금속부하가 쇠교를 하면 금속부하에는 벵돌이 전류라고 하는 와전류(Eddy Current)가 발생한다. 이 와전류와 금속부하의 고유저항에 의해서 줄(Joule) 열이 발생하여 가열되게 된다.

이러한 원리를 이용한 것이 유도가열 조리기이고 최근 국내에서 각광을 받고 있는 IH밥솥도 유도가열 원리를 적용한 제품이다. 국내보다는 주로 일본과 대만에서 한 개의 부하만을 가열할 수 있는 유도가열 조리기(1버너 IHC)가 많이 사용되고 있으며, 유럽 및 미국 등 서구에서는 주로 네 개의 부하를 가열할 수 있는 유도가열 조리기(4버너 IHC)를 주로 사용하고 있다.

위에서 언급한 제품들에 적용하고 있는 고주파 인버터는 주로 전압형 E급 준공진 인버터를 사용하고 있다.[2-4] 전압형 E급 준공진 인버터는 하나의 스위치를 사용하여 가장 경제적인 구성을 할 수 있는 반면에 출력은 보통 1.3kW 이하로 제한된다. 하지만 이 출력은 가스기기에 비해서 너무나 작은 출력이므로 최근에는 2kW 이상의 출력을 얻을 수 있는 하프 브릿지 인버터의 적용이 늘고 있다.[1, 5]

가전제품에 유도가열을 적용하려면 가칭잡음을 피해야 하므로 가칭주파수 이상에서 동작할 수 있도록 부하에는 가열코일과 공진 캐패시터가 직렬로 구성된 직렬공진회로를 채택하고 있다. 인버터의 동작주파수에 따라서 직렬공진회로는 공진주파수를 중심으로 가우스 분포의 출력특성을 갖는다. 가칭잡음을 피하고 하프 브릿지 인버터 스위치의 역병렬 다이오드의 역회복 특성을 없애기 위해서 인버터의 동작주파수는 공진주파수 이상에서 동작하여 공진주파수 근처에서 최대 출력을 내고 공진주파수 보다 커지면 낮은 출력을 내는 주파수제어로 출력을 제어한다. 물론 전압형 E급 준공진 인버터도 주파수제어로 출력을 제어한다.

이러한 인버터들을 부하가 여러개인 유도가열 조리기에 적용

하려면 각 부하별로 제어회로를 갖는 각각 하나의 인버터를 갖거나, 정류된 전원을 공통으로 하여 병렬로 인버터 회로를 구성하여야 한다. 하지만 이 경우 인접한 부하들 사이에 동작주파수의 차이에 의한 가칭잡음(간섭음)이 발생하기 때문에 고정주파수를 사용하던지[1] 아니면 인접된 부하들 사이에 시분할 제어를 해서 한순간에는 하나의 부하만 동작하도록 해야 한다. 고정주파수를 사용하는 경우 인버터 회로 및 제어회로도 복잡해지고 스위칭시 하드 스위칭이 되어 손실이 증가하게 된다.

본 논문에서는 위에서 언급한 인접한 부하들 사이의 가칭잡음을 없애기 위해서 시분할 제어를 하면서 영전압 스위칭 방식을 사용하여 손실이 현저하게 줄일 수 있는 간단한 새로운 회로 구조를 갖는 다부하를 갖는 이중 하프 브릿지 유도가열 조리기를 제안한다. 제안된 이중 하프 브릿지 인버터는 주파수제어를 통해서 출력을 제어하고 하나의 제어회로를 갖는 하나의 인버터로 두 개의 부하를 시분할 제어할 수 있어 전체 시스템의 크기를 줄일 수 있고 콤팩트하게 구성할 수 있다. 모드분석을 통해서 제안된 인버터의 동작을 설명하고 실험을 통해서 제안된 인버터의 타당성을 검증하였다.

#### 2. 제안된 이중 하프 브릿지 유도가열 조리기

그림 1은 제안된 다부하를 갖는 이중 하프 브릿지 유도가열 조리기를 보이고 있다. 제안된 회로는 상용전원을 정류기로 정류한 후 L, C 필터(L<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>)를 거쳐서 얻은 전압(V<sub>in</sub>)을 입력으로 해서 직렬로 연결된 세 개의 스위치 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>와 두 개의 L, C 공진탱크 L<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>과 L<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>로 구성되어 있다. 각 스위치에는 역병렬 다이오드와 영전압 스위칭을 위한 보조공진 캐패시터가 병렬로 연결되어 있다. 제안된 유도가열 조리기에서 공진소자 중 두 개의 인덕터 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>는 유도가열을 위해 나선형으로 감겨진 평평한 코일로 워킹코일이라고 불리며 가열할 부하용기의 밑에 놓인다. 만일 그림 2(a)와 같이 L<sub>1</sub>을 동작하려면 S<sub>2</sub>를 온시켜놓은 상태에서 S<sub>1</sub>과 S<sub>3</sub> 그리고 L<sub>1</sub>과 C<sub>1</sub>이 직렬 공진형 하프 브릿지 인버터를 구성하고, 만일 그림 2(b)와 같이 L<sub>2</sub>를 동작하려면 S<sub>1</sub>을 온시켜놓은 상태에서 S<sub>2</sub>와 S<sub>3</sub> 그리고 L<sub>2</sub>와 C<sub>2</sub>가 또 다른 직렬 공진형 하프 브릿지 인버터를 구성한다. 이와 같은 의미에서 제안된 방식을 이중 하프 브릿지 유도가열 조리기라고 명명했다.

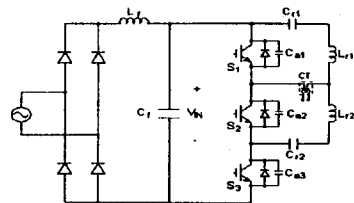
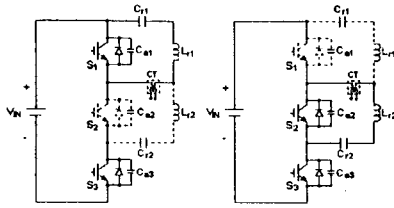


그림 1 제안된 이중 하프 브릿지 유도가열 조리기



(a) HB1 (b) HB2

그림 2 제안된 회로의 두 개의 하프 브릿지 인버터

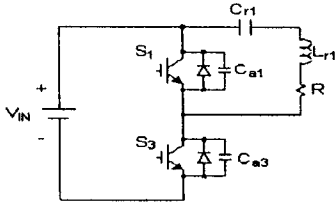


그림 3 모드해석을 위한 등가회로

### 3. 제안된 회로의 모드분석

여기서는 그림 3에 제시된 등가회로를 이용한 모드분석을 통하여 제안된 회로의 동작을 확인하였다. 한편, 그림 3에서 R은 워킹코일  $L_{r1}$ 의 저항성분과,  $L_{r1}$ 과 결합된 부하용기의 저항성분의 합이다. 하지만  $L_{r1}$ 의 저항성분은 부하용기의 저항성분에 비해 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 모드분석을 위하여 제안된 회로에 사용된 모든 능동소자 및 수동소자가 이상적이고, 스위칭 한주기동안 입력전압은 일정하다고 가정하였다. 각 모드별 동작은 그림 4와 그림 5의 회로와 동작파형을 가지고 설명한다. 먼저 초기상태는 다음과 같다. 여기서는  $L_{r1}$ 만 동작할 경우를 설명하므로 스위치  $S_2$ 는 항상 온되어 있고 그림 2의 HB1(Half-Bridge 1)이 동작을 한다.

(1) Mode 1 ( $t_1 \sim t_2$ ):  $S_1$ 은 오프되어 있고  $S_2$ 와  $S_3$ 의 역병렬 다이오드를 통해서 워킹코일  $L_{r1}$ 의 전류가 음의 방향에서 감소하고 있고 공진 캐패시터의 전압은 음의 값을 갖는 상황에서  $S_3$ 을 영전압 및 영전류의 조건에서 미리 온시켜 놓으면  $L_{r1}$ 의 전류가 영점을 지나는 순간부터 이 모드가 시작된다. 그러면  $L_{r1}$ ,  $C_{r1}$ , R의 공진탱크에는 입력전압  $V_{IN}$ 이 걸리고 공진에 의해서  $L_{r1}$ 의 전류  $i_{Lr1}$ 은 싸인파 모양을 그리며 증가한다. 공진의 반주기가 끝나기 전에 스위치  $S_3$ 을 오프시키면 이 모드는 끝난다.

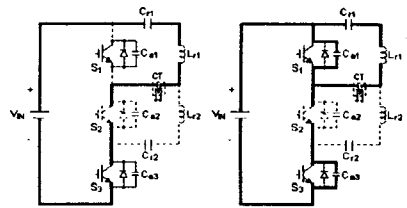
(2) Mode 2 ( $t_2 \sim t_3$ ): 이 모드는 영전압 스위칭을 위한 보조공진 구간으로  $S_1$ 과  $S_3$ 가 모두 오프되어 있고 공진탱크와 스위치 양단에 있는 보조공진 캐패시터  $C_{a1}$ ,  $C_{a3}$ 과 보조공진을 한다. 이에따라  $C_{a1}$ 의 전압은  $V_{IN}$ 에서 영으로 떨어지고  $C_{a3}$ 의 전압은 영에서  $V_{IN}$ 으로 상승한다.  $C_{a1}$ 의 전압이 영으로 떨어지면 다음 모드로 들어간다.

(3) Mode 3 ( $t_3 \sim t_4$ ): 이 구간은  $S_1$ 의 역병렬 다이오드를 통하여 주 공진이 계속되는 구간으로, 전류  $i_{Lr1}$ 이 싸인파 모양을 그리며 공진하여 영이 되면 끝난다. 이 구간에서 미리 스위치  $S_1$ 을 온시켜 놓으면 영전압 조건에서 온을 시킬 수 있다.

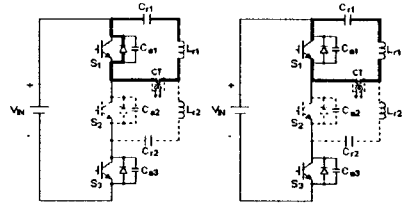
(4) Mode 4 ( $t_4 \sim t_5$ ): 스위치  $S_1$ 을 통해서 주 공진이 계속되지만 이 경우에는 공진탱크에 영전압을 가해준다. 이 모드도 Mode 1과 유사하게 공진의 반주기가 끝나기 전에 스위치  $S_1$ 을 오프시키면 이 모드는 끝난다.

(5) Mode 5 ( $t_5 \sim t_6$ ): 이 모드는 Mode 2와 같이 영전압 스위칭을 위한 보조공진 구간으로  $S_1$ 과  $S_3$ 가 모두 오프되어 있고 공진탱크와 스위치 양단에 있는 보조공진 캐패시터  $C_{a1}$ ,  $C_{a3}$ 과 보조공진을 한다. 이에따라  $C_{a1}$ 의 전압은 영에서  $V_{IN}$ 으로 올라가고  $C_{a3}$ 의 전압은  $V_{IN}$ 에서 영으로 떨어진다.  $C_{a1}$ 의 전압이  $V_{IN}$ 과 같아지면 다음 모드로 들어간다.

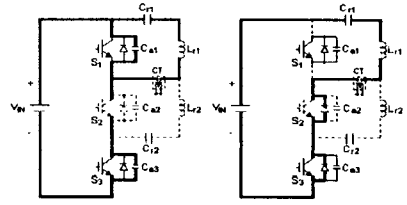
(6) Mode 6 ( $t_6 \sim t_7$ ): 이 구간은  $S_3$ 의 역병렬 다이오드를 통하여 주 공진이 계속되는 구간으로, 전류  $i_{Lr1}$ 이 싸인파 모양을



(a) Mode 1 (b) Mode 2



(c) Mode 3 (d) Mode 4



(e) Mode 5 (f) Mode 6

그림 4 각 모드별 동작해석

그리며 공진하여 영이 되면 끝난다. 이 구간에서 미리 스위치  $S_3$ 을 온시켜 놓으면 영전압 조건에서 온을 시킬 수 있다.

위와같이 6개의 모드를 통해서 한주기가 끝나고 같은 동작이 반복된다. 만일  $L_{r2}$ 를 동작시킬 경우는 스위치  $S_1$ 을 항상 온시켜 놓고 그림 2의 HB2(Half-Bridge 2)로 위에서 설명한 동작을 하면 된다.

각 모드별 지배방정식인 공진 파라미터의 전압 및 전류식은 아래와 같다. 먼저 공진탱크에 입력전압이 걸리는 모드인 Mode 6에서 Mode 1에 이르는 기간동안의 지배방정식은 아래의 식(1), (2)와 같다.

$$i_{Lr1}(t) = e^{-\frac{R}{2L_{r1}}t} \left\{ K(0) \cos \omega_n t + \left( \frac{V_{IN} - V(0)}{L_{r1}} - \frac{R}{2L_{r1}} K(0) \right) \frac{1}{\omega_n} \sin \omega_n t \right\} \quad (1)$$

$$v_{Cn}(t) = V_{IN} - e^{-\frac{R}{2L_{r1}}t} \left\{ (V_{IN} - V(0)) \cos \omega_n t + \left( \frac{R}{2L_{r1}} (V_{IN} - V(0)) - \frac{K(0)}{C_{r1}} \right) \frac{1}{\omega_n} \sin \omega_n t \right\} \quad (2)$$

여기서 초기전류  $K(0) = i_{Lr1}(0)$ 로 바로 전모드의 최종치이고 초기전압  $V(0) = v_{Cn}(0)$ 도 전모드의 최종치이다. 동작주파수

인  $\omega_n = \sqrt{\frac{1}{L_{r1} C_{r1}} - \left( \frac{R}{2L_{r1}} \right)^2}$ 이다. 위의 수식 중 변수  $t$ 는 바로 전변주기에서의 Mode 6의 시작시 영의 값을 가지면 된다.

다음으로 공진탱크에 영전압이 걸리는 모드인 Mode 3에서 Mode 4에 이르는 기간동안의 지배방정식은 다음과 같다.

$$i_{Lr1}(t) = e^{-\frac{R}{2L_{r1}}t} \left\{ K(0) \cos \omega_n t - \left( \frac{V(0)}{L_{r1}} + \frac{R}{2L_{r1}} K(0) \right) \frac{1}{\omega_n} \sin \omega_n t \right\} \quad (3)$$

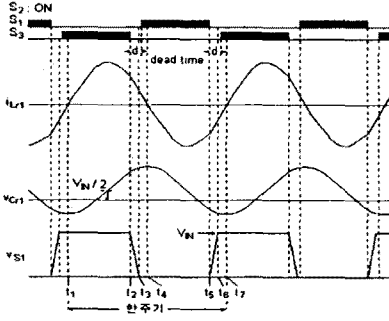


그림 5  $L_1$ 에 대한 각 동작과형

$$v_{C1}(t) = e^{-\frac{R}{2L_1}t} \left( V(0) \cos \omega_s t + \left( -\frac{R}{2L_1} V(0) + \frac{R(0)}{C_1} \right) \frac{1}{\omega_s} \sin \omega_s t \right) \quad (4)$$

여기서도 초기치들은 바로 진모드의 최종값을 취하면 된다. 만일 보조공진 구간인 Mode 2와 Mode 5의 시간이 다른 구간에 비해서 매우 작다면 위의 수식만으로도 제한된 회로의 동작특성을 확인할 수 있다.

#### 4. 실험결과

앞에서 언급한 동작을 확인하기 위해서 본 논문에서는 230V 2.8kW급의 이중 하프 브릿지 유도가열 조리기를 제작하였다. 여기서 사용된 워킹코일의 인덕턴스는 무부하시 72[uH]이고 표준 부하시 동작주파수에 따라서 변하기는 하지만 최대출력시 38[uH]이다. 공진 캐패시터  $C_c$ 은 1.5[uF]이고 보조공진 캐패시터  $C_s$ 는 47[nF]이다. 임력필터는 각각 0.5[mH]와 5[uF]이다.

그림 6은 소비전력이 2.8kW일 때 워킹코일 전류  $i_{L1}$ 과 스위치 전압  $v_{S1}$ 이다. 앞에서 설명한 동작설명과 잘 일치하지만 스위치 양단의 전압파형이 경사가 발생하는데 이것은 정류단 다음에 연결된 LC필터가 역률을 개선하기 위해서 작은 값을 사용했기 때문이다. 그림 7은 각 소비전력에 대한 전원측의 역률을 보이고 있는데 최대출력에 대해서 거의 99%의 높은 역률을 보이고 있다. 그림 8은 두 개의 부하를 동시에 가열할 경우에 있어서 순간 교번가열을 하였을 때의 두 워킹코일의 전류파형을 보이고 있다. 본 논문에서는 이 경우에 대한 자세한 분석은 하지 않았지만 문제없이 교번가열이 잘 이루어 지고 있음을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 여러개의 부하를 갖는 유도가열 조리기에서 있어서 인접한 부하의 동작주파수의 차이에 의해 발생하는 가청 잡음을 없애고, 손실을 줄이기 위해서 영진압 스위칭 방식을 사용하는 새로운 방식의 이중 하프 브릿지 유도가열 조리기를 제안하였다. 제안된 유도가열 조리기는 두 개의 직렬공진형 고주파 인버터가 결합된 형태로 하나의 제어회로로 두 개의 부하를 시분할 제어를 할 수 있어서 전체 시스템의 부피를 줄여서 콤팩트한 시스템을 구성할 수 있다.

모드분석을 통해서 제안된 이중 하프 브릿지 직렬공진형 고주파 인버터의 동작을 설명하였다. 230V 2.8kW급의 유도가열 조리기를 제작하여 실험을 통해서 제안된 유도가열 조리기의 동작을 확인 하고 타당성을 검증하였다.

#### 참 고 자 료

[1] L. Hobson, D. W. Tebb and D. Turnbull, "Dual-Element Induction Cooking Unit Using Power MOSFETs", *International Journal of Electronics*, Vol. 59, No. 6, pp. 747-757, 1985.  
 [2] H. Omori and M. Nakaoka, "New Single-Ended Resonant Inverter Circuit And System For Induction-Heating Cooking Apparatus", *International Journal of Electronics*, Vol. 6, No. 2, pp. 277-296, 1989.

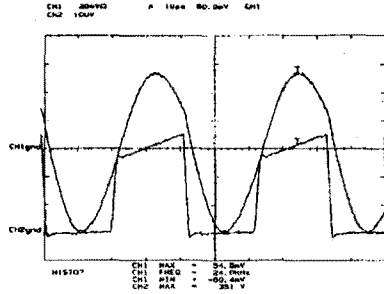


그림 6 워킹코일 전류  $i_{L1}$  (20A/div)과 스위치 전압  $v_{S1}$  (100V/div) ( $P_m=2.8kW$ )

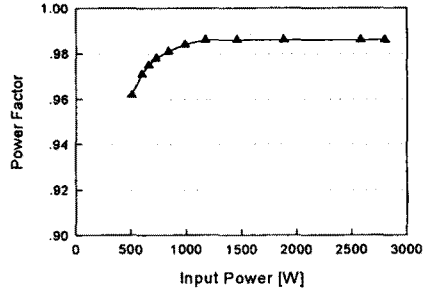


그림 7 입력 Power에 따른 역률

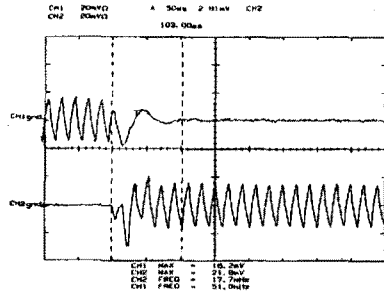


그림 8 부하일한시 각 워킹코일의 전류파형 (20A/div)

[3] H. W. E. Koertzen, J. A. Ferreira and J. D. van Wyk, "A Comparative Study Of Single Switch Induction Heating Converters Using Novel Component Effectivity Concepts", *IEEE IAS Conference Record*, pp. 298-305, 1992.  
 [4] H. W. E. Koertzen, J. D. van Wyk and J. A. Ferreira, "An Investigation Of The Analytical Computation Of Inductance And AC Resistance Of The Heat-Coil For Induction Cookers", *IEEE IAS Conference Record*, pp. 1113-1119, 1992.  
 [5] H. W. E. Koertzen, J. A. Ferreira and J. D. van Wyk, "Design Of The Half-Bridge, Series Resonant Converter For Induction Cooking", *IEEE PESC*, pp. 729-735, 1995.  
 [6] 노희석, 권경안, 양우중, "유도가열 부하를 갖는 인버터 회로의 해석에 관한 연구", *대한전기학회 학제학술대회*, Vol. A, pp. 424-427, 1995.