

12V 차량용 배터리를 이용한 캠핑용 Induction Cooker 공진 네트워크 설계

김정환, 장은수, 박상민, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Design of Resonant Network for Potable Induction Cooker with 12V Battery of Vehicle

Junghwan Kim, Eunsu Jang, Sang Min Park, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 차량용 12V 배터리 전원을 이용한 캠핑용 Induction Cooker를 설계한다. 캠핑용 Induction Cooker의 전력변환장치에 적합한 DC-link 전압 (V_{DC}) 및 동작 주파수 (f_{sw})를 선정하기 위해 각 조건에 따른 전력변환장치의 공진 네트워크를 설계한다. 또한 이론적 분석 및 시뮬레이션을 통해 각 조건 별 전력반도체 소자에서 발생하는 손실 비교 분석을 수행한다. 분석 결과를 통해 공진 네트워크의 적합한 V_{DC} 및 f_{sw} 를 선정한다.

1. 서론

가정에서 사용되는 Highlight 및 Induction cooker는 쾌적한 조리 환경 조성, 안전성, 효율 및 가열 성능 등의 이유로 인해 기존의 가스레인지를 대체하는 대표적인 조리 기구이다. 특히 Induction heating (IH) 방식을 적용한 Cooker는 Highlight 대비 조리 시간이 빠르고 가열 시 사용 용기만 발열 시켜 안전성이 높은 장점이 있다. 또한 Induction cooker는 주방이라는 공간적인 제한에서 벗어나 220V 상용 전원을 통해 장소에 무관하게 사용할 수 있는 Portable (1구) 제품이 개발되어 출시되고 있다. 이와 관련하여 최근 각종 매체를 통해 캠핑에 대한 관심이 증가함에 따라 캠핑 용품에 대한 수요가 증가하고 있다. 이로 인해 화재 사고의 위험성 및 날씨와 같은 외부 환경의 영향이 큰 단점을 갖는 가스 버너를 대체할 수 있는 IH 기술을 접목한 조리 기구의 적용 가능성에 대한 연구가 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 승압형 DC-DC 컨버터와 Half-Bridge Series Resonant Converter (HB-SRC)로 구성된 2-stage 구조의 차량용 12V 배터리를 이용한 800W급 캠핑용 Induction cooker의 설계 및 검증을 수행한다. 제안하는 시스템에 적합한 동작 조건을 제시하기 위해 DC-DC 컨버터를 통해 승압된 V_{DC} 및 HB-SRC의 동작 주파수 (f_{sw})조건에 따른 시스템의 공진 네트워크를 각각 설계하고 시뮬레이션을 통해 설계한 네트워크를 검증한다. 마지막으로 PSIM 시뮬레이션을 기반으로 계산한 전력반도체 소자에서 발생하는 손실의 수학적 분석을 통해 캠핑용 Induction cooker의 고효율 동작을 위한 DC-DC 컨버터의 승압비 및 HB-SRC의 f_{sw} 등의 캠핑용 Induction cooker의

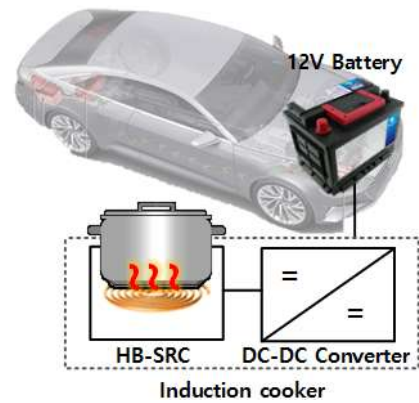


그림 1 캠핑용 Induction Cooker의 구성도
 Fig. 1 Diagram of Induction Cooker for Camping.

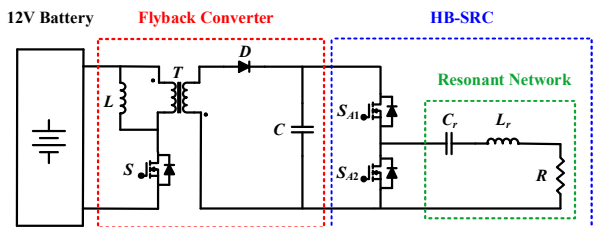


그림 2 2-stage Induction cooker 회로도
 Fig. 2.Schematic of 2-stage induction cooker.

설계 고려 사항을 제시한다.

2. 캠핑용 Induction cooker 설계 및 분석

2.1 캠핑용 Induction cooker 설계 고려사항

서론에서 언급한 바와 같이 본 논문에서 다루는 캠핑용 Induction cooker는 차량용 12V 배터리를 전원으로 사용한다. 따라서 DC-DC 컨버터 stage는 그림 2를 통해 볼 수 있듯이 높은 승압비를 고려하여 절연형 토폴로지인 Flyback 컨버터를 선정하며 공진형 컨버터의 토폴로지는 위킹 코일에 직렬로 공진 커패시터 (C_r)를 연결함으로써 가장 간단한 구성을 갖는 HB-SRC를 선정한다^[1].

HB-SRC stage에서 발생하는 주요 손실 요인은 스위치 도통 손실 (P_{MOSFET_cond})과 스위칭 손실 (P_{MOSFET_sw}), 다이오드 도통 손실 (P_{Diode_cond})이며 식 (1), (2), (3)을 통해 계산



(a) 상단 (b) 하단
 그림 3 캠핑용 Induction cooker용 워킹 코일
 Fig. 3 Working coil for induction cooker for camping.

할 수 있다^[2]. 따라서 시스템의 HB-SRC stage 고효율 동작을 위해서는 식 (1), (2), (3)을 통해 계산할 수 있는 전력반도체 소자에서 발생하는 손실 요인들을 최소화하도록 설계되어야 한다. 이를 위해 다음의 두 가지 사항에 대한 분석이 필수적으로 수행되어야 한다. 1) DC-DC 컨버터의 승압 비: 캠핑용 Induction cooker는 목표 최대 전력을 만족하기 위해 12V 전압의 승압을 요구한다. 하지만 식 (1)을 통해 볼 수 있듯이 V_{DC} 에 비례하여 P_{MOSFET_SW} 가 증가하기 때문에 V_{DC} 의 적절한 승압 비에 대한 검토가 필요하다. 2) HB-SRC의 f_{sw} : f_{sw} 가 증가할수록 피가열체인 용기의 등가 저항 (R_{eq})은 증가한다. 따라서 전력변환장치가 높은 주파수 영역에서 동작 시 목표 전력을 만족하기 위한 공진 전류 ($i_{d,avg}$)의 크기를 감소시킴으로써 P_{MOSFET_cond} 와 P_{Diode_cond} 를 저감할 수 있다. 하지만 너무 높은 f_{sw} 영역에서 동작 시 P_{MOSFET_SW} 의 증가할 수 있기 때문에 적합한 f_{sw} 의 설계가 수행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 f_{sw} 및 V_{DC} 조건에 따라 각각 설계된 HB-SRC stage에서 발생하는 손실을 비교 및 분석함으로써 캠핑용 Induction cooker의 고효율 동작을 위한 설계 가이드라인을 제시한다.

$$P_{MOSFET_SW} = \frac{V_{in} i_{off} f_{sw} t_{off}}{2} \quad (1)$$

$$P_{Diode_cond} = V_F i_{f,dead} \quad (2)$$

$$P_{MOSFET_cond} = R_{DS(on)} i_{d,avg}^2 \quad (3)$$

2.2 공진 네트워크 설계

본 논문에서 제안하는 캠핑용 Induction cooker에 적용한 워킹 코일은 그림 3과 같다. 그림 3의 워킹 코일과 용기는 그림 4와 같이 변압기 모델로 나타낼 수 있으며 용기 저항 (R_2), 인덕턴스 (L_2) 및 워킹 코일 저항 (R_1), 인덕턴스 (L_1)는 R-L 직렬 부하로 등가 모델링 될 수 있다^[3]. 각각의 등가 파라미터는 식 (4), (5)을 통해 계산할 수 있으며 LCR 미터를 통해 주파수에 따라 측정된 결과는 그림 5와 같다.

$$R_{eq} = R_1 + \frac{(\omega M)^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (4)$$

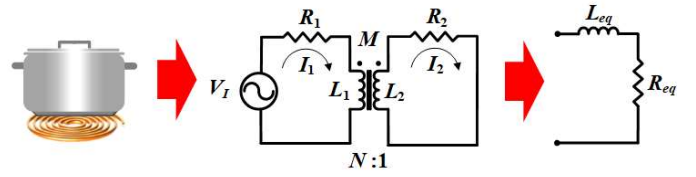


그림 4 유도가열시스템의 등가회로
 Fig. 4 Equivalent Circuit of Induction Heating System

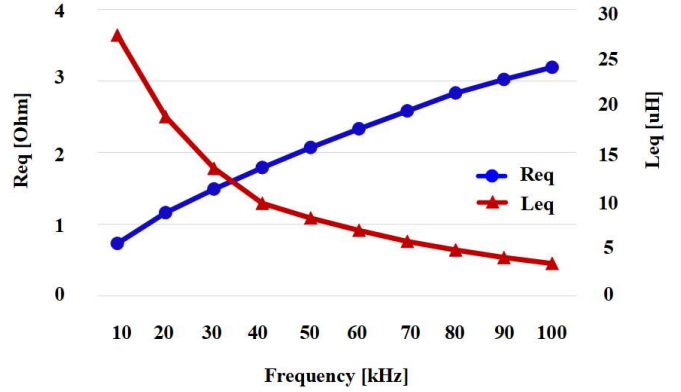


그림 5 각 주파수 별 등가 파라미터
 Fig. 5 Equivalent parameter of working coil according to frequency variation.

$$L_{eq} = L_1 - \frac{(\omega M)^2 L_2}{R_2 + (\omega L_2)^2} \quad (5)$$

$$C_r = \left(\frac{1}{2\pi f \sqrt{L}} \right)^2 \quad (6)$$

그림 5를 통해 볼 수 있듯이 등가 인덕턴스 (L_{eq})는 변압기 모델링 시의 상호 인덕턴스 (M)로 인해 주파수가 증가함에 따라 감소하는 반면 R_{eq} 은 침투 깊이의 감소에 따라 주파수가 증가할수록 비례하여 증가하는 양상을 나타낸다^[4]. C_r 의 설계는 그림 5의 측정된 등가 파라미터를 바탕으로 식 (6)과 같이 계산할 수 있다. 식 (4), (5), (6)을 통해 주파수 조건 및 V_{DC} 조건에 따라 공진 네트워크를 각각 설계하였으며

표 1 설계한 공진 네트워크 파라미터
 Table 1 Designed resonant network parameters

공진 네트워크 파라미터							
DC-link 전압	V_{DC}	공진 주파수	f_r	공진 인덕턴스	L_r	공진 커패시턴스	C_r
90 [V]	90 [V]	20 [kHz]	20 [kHz]	22.75 [uH]	22.75 [uH]	2.78 [uF]	2.78 [uF]
		30 [kHz]	30 [kHz]	20.63 [uH]	20.63 [uH]	1.36 [uF]	1.36 [uF]
100 [V]	100 [V]	20 [kHz]	20 [kHz]	22.75 [uH]	22.75 [uH]	2.78 [uF]	2.78 [uF]
		30 [kHz]	30 [kHz]	20.63 [uH]	20.63 [uH]	1.36 [uF]	1.36 [uF]
		40 [kHz]	40 [kHz]	19.57 [uH]	19.57 [uH]	0.81 [uF]	0.81 [uF]
110 [V]	110 [V]	20 [kHz]	20 [kHz]	22.75 [uH]	22.75 [uH]	2.78 [uF]	2.78 [uF]
		30 [kHz]	30 [kHz]	20.63 [uH]	20.63 [uH]	1.36 [uF]	1.36 [uF]
		40 [kHz]	40 [kHz]	19.57 [uH]	19.57 [uH]	0.81 [uF]	0.81 [uF]
120 [V]	120 [V]	20 [kHz]	20 [kHz]	22.75 [uH]	22.75 [uH]	2.78 [uF]	2.78 [uF]
		30 [kHz]	30 [kHz]	20.63 [uH]	20.63 [uH]	1.36 [uF]	1.36 [uF]
		40 [kHz]	40 [kHz]	19.57 [uH]	19.57 [uH]	0.81 [uF]	0.81 [uF]
120 [V]	120 [V]	50 [kHz]	50 [kHz]	18.42 [uH]	18.42 [uH]	0.55 [uF]	0.55 [uF]
		50 [kHz]	50 [kHz]	18.42 [uH]	18.42 [uH]	0.55 [uF]	0.55 [uF]

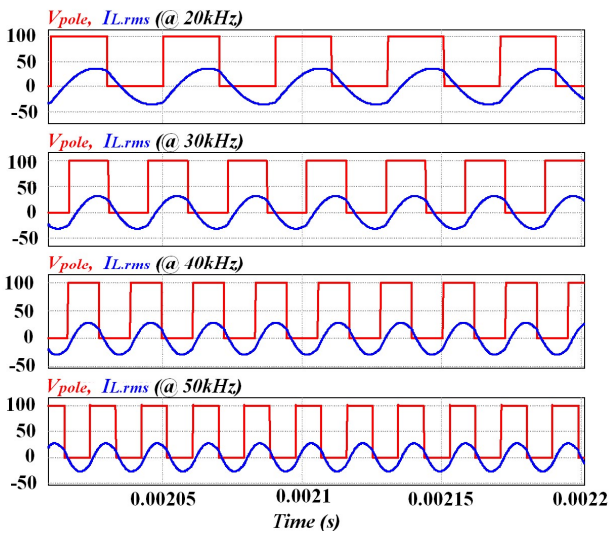
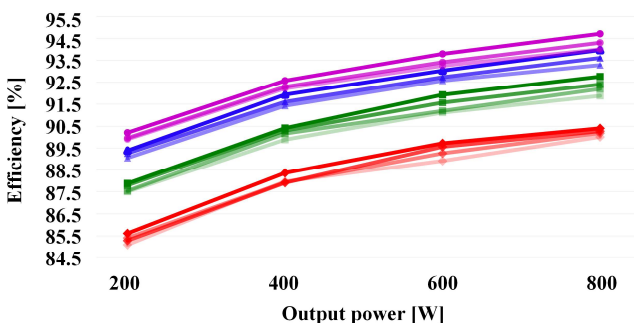


그림 6 주요 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation waveforms of the frequency conditions.

설계한 파라미터는 표 1과 같다. 설계한 공진 네트워크는 각 조건 별 폴 전압 (V_{pole})과 공진 네트워크에 흐르는 전류 ($I_{L,rms}$)를 확인하여 정상 동작 및 공진 주파수 이상에서 스위치 turn-on 시에 소프트 스위칭이 가능한 Zero Voltage Switching (ZVS) 영역에서의 동작을 PSIM 시뮬레이션을 통해 그림 6과 같이 검증하였다.

2.3 손실 비교 및 분석

본 절에서는 표 1과 같이 설계된 HB-SRC의 손실 분석을 수행한다. 손실 분석에 사용한 소자는 낮은 온저항 특성 ($R_{DS(on)}$)과 게이트 충 전하량 (Q_g) 특성을 고려하여 Infineon社 IRF300P227로 선정한다. 식 (1), (2), (3)을 통해 계산한 주파수 및 V_{DC} 조건에 따른 전력변환장치의 효율은 그림 7과 같다. 반도체 소자에서 발생하는 손실 양상에 대한 분석 결과는 다음과 같다. R_{eq} 는 주파수에 따라 비례하여 증가하므로 f_{sw} 가 증가에 따른 $i_{d,avg}$ 의 감소로 인해 $P_{MOSFET,cond}$ 은 식 (3)과 같이 감소한다.



f_{sw}	V_{DC}	f_{sw}	V_{DC}	f_{sw}	V_{DC}	f_{sw}	V_{DC}
20 [kHz]	90 [V]	30 [kHz]	90 [V]	40 [kHz]	100 [V]	50 [kHz]	100 [V]
20 [kHz]	100 [V]	30 [kHz]	100 [V]	40 [kHz]	110 [V]	50 [kHz]	110 [V]
20 [kHz]	110 [V]	30 [kHz]	110 [V]	40 [kHz]	120 [V]	50 [kHz]	120 [V]
20 [kHz]	120 [V]	30 [kHz]	120 [V]				

그림 7 각 조건에 따른 효율 그래프
Fig. 7 Efficiency graph according to V_{DC} and f_{sw} conditions.

$P_{Diode,cond}$ 는 식 (2)와 같이 데드타임 구간에서 다이오드로 흐르는 전류 ($i_{f,dead}$)에 비례하여 증가하며 $i_{f,dead}$ 는 폴전압과 공진 전류의 위상차에 비례하여 증가하는 것을 그림 6을 통해 볼 수 있다. 따라서 $P_{Diode,cond}$ 역시 주파수가 증가할수록 감소하는 양상을 갖는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 $P_{MOSFET,SW}$ 는 식 (1)을 통해 f_{sw} 및 V_{DC} 에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다^[5]. 스위치 turn-off 전류 (i_{off})는 전력변환장치의 f_{sw} 에 따라 감소하지만 f_{sw} 에 대한 영향이 크기 때문에 $P_{MOSFET,SW}$ 는 f_{sw} 에 따라 증가한다. 따라서 전력변환장치에서 발생하는 손실 측면에서의 종합적인 분석 결과는 다음과 같다. 그림 7을 통해 전력변환장치가 800W를 만족하기 위한 최소 V_{DC} 이상의 전압 조건에서 동작 시 효율이 감소하는 것을 볼 수 있으며 위에서 분석한 바와 같이 f_{sw} 는 목표 전력을 만족하는 범위 내에서 최대한 높을수록 $i_{d,avg}$ 의 감소에 의해 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이를 위해 너무 f_{sw} 를 증가 시킬 경우 그림 6을 통해 예상할 수 있듯이 R_{eq} 의 과도한 증가로 인해 목표하는 전력을 만족할 수 없다. 그러므로 설계한 워킹 코일의 등가 파라미터를 바탕으로 한 f_{sw} 의 선정이 수행되어야 한다.

3. 결론

논문은 차량용 12V 배터리 전원을 이용한 캠핑용 800W급 2-stage Induction cooker 설계 방안을 제안하였다. 이를 위해 설계한 워킹 코일의 R_{eq} 및 I_{eq} 파라미터를 측정하고 DC-DC 컨버터의 V_{DC} 승압비 및 HB-SRC의 f_{sw} 조건 별로 공진 네트워크를 설계하였다. PSIM 시뮬레이션을 통해 시스템의 정상 동작을 검증하였으며 전력변환장치의 손실 분석을 수행하였다. 이를 바탕으로 12V 배터리를 이용한 Induction cooker의 고효율 동작을 위한 V_{DC} 및 f_{sw} 의 도출 방안을 제안하였다.

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20184030202190)

참고 문헌

- [1] S. M. Park, H. G. Woo, and D. C. Shin, "A study on the stabilization of induction heating system for using high-frequency series resonant inverter", *2010 Power Electronics Annual Conference*, pp. 506-507, Jul, 2010.
- [2] D. Graovac, M. Purschel, and A. Kiep, "MOSFET power losses calculation using the data-sheet parameters", in *Infineon Application Note*, Jul, 2006.
- [3] S. R. Ghuge, M. R. Roda, "Summary of overall topologies of an induction cooker for home use (298)", *International Conference on Energy System and Application (ICESA 2015)*, pp. 655-657, Oct, 2015.
- [4] Y. S. Kwon, S. B. Yoo, D. S. Hyun "A study on the improvement of performance and stability of induction heating system", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 48, No. 8, pp. 417-425, Aug, 1999.
- [5] D. Graovac, M. Purschel, and A. Kiep, "MOSFET Power Losses Calculation Using the Data Sheet Parameters", *Application Note*, Infineon, Jul, 2006.