

GaN-HEMT 기반 Anyplace Induction Cooktop용 전력변환장치 설계 및 분석

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

Design and Analysis of Power Conversion System for GaN-HEMT Based Anyplace Induction Cooktop

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

ABSTRACT

본 논문에서는 Anyplace Induction Cooktop 시스템의 설계 방안을 제시한다. 다수의 워킹코일이 적용된 Anyplace 시스템은 전력밀도 향상을 위해 고주파 동작이 필요하다. 따라서 시뮬레이션 및 수학적 계산을 통한 동작 주파수, 전력 반도체 소자 조건 별 시스템의 손실 및 부피 간 Trade-off 분석이 필요하다. 따라서 분석 결과를 토대로 각 전력반도체 소자 기반 시스템의 적합한 동작 주파수 영역 및 공진 네트워크 설계 방안을 제시한다.

1. 서론

안정성 및 편리성을 추구하는 소비자의 요구에 따라 가전 제품에 대한 다양한 연구 및 개발이 진행되어오고 있다. Induction cooktop의 경우, 가스레인지 및 하이라이트와 같은 기존 제품에 비해 높은 안전성과 유지 관리의 용이성 등의 장점으로 인해 관심을 받고 있는 대표적인 제품이다. Induction cooktop에 대한 최근 연구는 용기 재질에 무관한(자성/비자성) 가열, 용기 가열 개수의 증가 및 용기 가열 위치/형상에 대한 자유도 개선을 목적으로 수행되고 있으며 이를 기반으로 한 다양한 제품들이 출시되고 있다. 이 중 용기의 위치 및 형상에 대한 제한 없이 가열이 가능한 Anyplace Induction cooktop은 기존 Induction cooktop에 비해 더 많은 워킹 코일의 개수가 요구된다.^[1]

Anyplace Induction Cooktop은 워킹 코일을 그룹화하는 방식에 따라 단일 인버터에 다수의 워킹코일을 할당하는 방식과 인버터 및 워킹코일을 1:1로 매칭하는 일체형 방식으로 분류할 수 있다. 단일 인버터를 사용하는 방식의 경우 요구되는 스위칭 소자의 수가 적기 때문에 시스템의 부피가 감소하며 가격 측면에서 용이하다. 하지만 워킹 코일간의 결합을 위해 릴레이와 같은 다수의 스위칭 소자가 사용되므로 소음 및 신속한 용기 감지 측면의 불리함을 갖는다. 반면 다수의 인버터를 사용하는 방식의 경우 시스템의 부피가 증가하고 스위칭 소자의 수가 증가하는 단점이 존재하나 코일 간 결합을 위한 스위칭 소자의 사용이 불필요하며 상대적으로 빠른 용기 감지가 가능하다. 이러한 이유로 본 논문에서는 그림 1와 같이 워킹 코일 및 인버터가 1:1로 매칭된 일체형 방식을 적용한다. 일체형 방식의 시스템의 경우 워킹 코일 하단에 매칭된 인버터가 위치하므로 할당된 구역이 협소하다. 따라서 전력변환장치의 전력 밀도 개선을 위한 고주파 동작이 요구되며 이에 따른 GaN-High Electron Mobility Transister (HEMT)

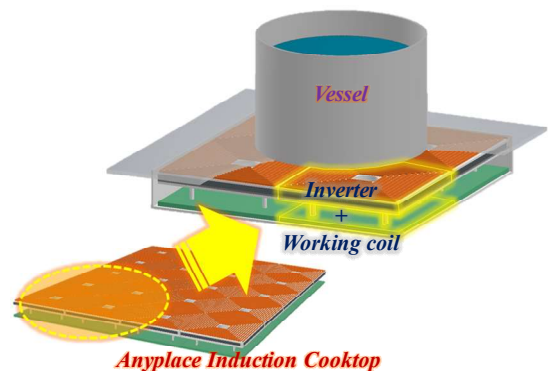


그림 1 워킹 코일 및 인버터가 1:1로 매칭된 일체형 방식
 Fig. 1 Configuration of integrated working coil and inverter.

소자 적용의 필요성에 대한 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 Si-MOSFET, GaN-HEMT 소자의 적용에 대한 Trade-off 분석을 진행한다. 이를 위해 일체형 방식을 적용한 시스템의 설계 및 검증은 수행하고 시뮬레이션 결과를 기반으로 동작 주파수 별 전력 반도체 소자에서 발생하는 손실을 비교 분석함으로써 전력반도체 소자에 따른 적합한 동작 주파수 영역을 제시한다.

2. 전력 반도체 소자에 따른 비교 및 분석

본 절에서는 표 1과 같은 설계 파라미터를 만족하는 시스템을 설계하여 전체 시스템의 정량적인 손실 분석을 통해 각 소자 조건 별 시스템의 적합한 동작 주파수 영역을 제시한다.

2.1 전력 반도체 소자별 특성 비교

서론에서 언급한 바와 같이 일체형 방식은 구조적인 제한으로

표 1 설계 파라미터
 Table 1 System parameters

Parameters	Value [Unit]
DC-Link Voltage, V_{DC_Link}	311 [V]
The number of turns of working coil	15 [Turn]
Maximum Input Power per each working coil, $P_{max}/coil$	1.2 [kW]
Maximum System Input Power, P_{max}	3.2 [kW]

표 2 전력 반도체 소자에 따른 특성

Table 2 Characteristics of Power Semiconductor devices

Component	Si	SiC	GaN
Band Gap [eV]	1.12	3.26	3.39
Electric Field [10^6 V/cm]	0.23	2.5	3.7
Electron Mobility [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$]	1400	950	800/1700
Electron Saturation Velocity [10^6 cm/sec]	10	22	25

인해 높은 전력밀도를 갖도록 설계되어야 하기 때문에 이를 고려한 스위칭 소자의 선정이 요구된다. 표 2을 통해 볼 수 있듯이 GaN-HEMT는 넓은 energy gap, 높은 electom mobility 및 electric field for breakdown 특성을 갖으며 낮은 드레인-소스 사이의 저항 ($R_{ds(on)}$), gate-drain 간 전하량(Q_g)을 갖는 소자로서 높은 전력밀도 설계에 용이한 장점을 갖는 소자이다. 반면 Si-MOSFET의 경우 GaN-HEMT 소자에 비해 낮은 특성을 갖지만 일반적인 Si-MOSFET에 비해 $R_{ds(on)}$ 이 낮고 고주파 동작에 용이한 super junction MOSFET (SJ-MOSFET)을 선정함으로써 동일한 패키지 타입의 GaN-HEMT 및 SJ-MOSFET 소자 적용 시의 동작 주파수에 따른 Trade-off 분석을 수행할 필요가 있다.

2.2 주파수 조건 별 공진 네트워크 설계

본 절에서는 전력 반도체 소자에 따른 Anyplace Induction Cooktop 시스템의 손실 분석을 위해 각 동작 주파수 조건에 따른 공진 네트워크를 설계한다. 공진 네트워크는 그림 2-a와 같이 단일 P_{coil} 을 만족하도록 설계하며 손실 분석은 (시스템 최대 전력)을 만족하는 경우를 가정하여 그림 2-b와 같은 조건에서 수행한다. 앞서 언급한 바와 같이 동작 주파수 조건 별 SJ-MOSFET 및 GaN-HEMT에 따른 시스템의 손실을 계산하기 위해 100-500kHz의 각 주파수 조건에서 공진 네트워크를 설계한다. 공진 커패시턴스는 워킹 코일에 투영된 용기의 등가 저항 및 인덕턴스와 식 (1)-(2)를 통해서 계산할 수 있으며 100-500kHz의 각 주파수 조건에서 각각 최대 전력을 만족할 수 있도록 설계한다^[2]. 이를 토대로 각 주파수 조건 별 설계한 공진 네트워크의 주요 시뮬레이션 파형은 그림 3과 같다.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C}} \quad (1)$$

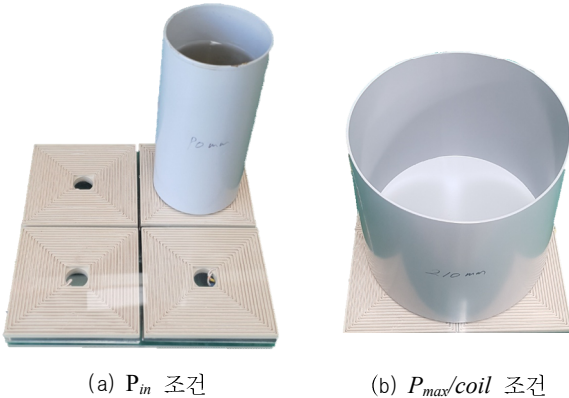


그림 2 공진 네트워크 설계를 위한 워킹 코일에 투영된 용기
Fig. 2 Vessel with working coil for resonant network design.

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_o^2 L_{eq}} \quad (2)$$

전력반도체 소자별 손실 비교 분석은 대표적인 손실 요인인 스위치 도통 손실 P_{cond} , 다이오드 도통 손실 P_{diode} , 스위칭 손실 P_{sw} 등을 계산함으로써 수행하며 아래의 수식들을 통해 계산할 수 있다.^[3]

$$P_{cond} = i_s^2 \times R_{ds(on)} \quad (3)$$

$$P_{diode} = I_{diode} \times V_F \quad (4)$$

$$P_{sw} = \frac{V_{DC} \times i_{off} \times f_{sw} \times t_{off}}{2} \quad (5)$$

$$t_{off} = \frac{V_{DC} \times C_{r_{ss(aver)}} \times R_{gate}}{V_m} \quad (6)$$

P_{cond} 은 식 (1)과 같이 스위치에 흐르는 전류 (i_s)와 드레인-소스 사이의 저항 ($R_{ds(on)}$)을 통해 계산한다. P_{diode} 는 식 (2)와 같이 dead time 동안 다이오드에 흐르는 평균 전류 (I_{diode})와 다이오드의 순방향 전압 (V_F)을 통해 나타낼 수 있다. P_{sw} 는 V_{DC} 와 스위치 오프 시의 전류 (i_{off}), 스위칭 시간 (t_{off}) 및 f_{sw} 를 통해 근사적으로 식 (3)과 같이 계산할 수 있으며 (t_{off})는 스위치 기생 커패시턴스중 하나인 역방향 전송 커패시턴스의 평균값 ($C_{r_{ss(aver)}}$), 게이트 저항 (R_{gate}), 밀러 플레이트 전압 (V_m)을 고려하여 식 (4)와 같이 나타내었다.

비교적 낮은 주파수 영역의 경우 $R_{ds(on)}$ 에 비례하는 P_{cond} 가 전체 시스템에서 발생하는 손실들 중 가장 큰 비중을 차지할 것으로 예상된다. 반면에 비교적 높은 주파수 영역의 경우 높은 f_{sw} 의 조건에서 동작해야 하므로 P_{sw} 의 비중이 증가할 것으로 예상된다. 특히 Si-MOSFET의 경우 비교적 낮은 Q_g 로 인하여 GaN-HEMT에 비해 더 큰 P_{sw} 이 발생할 것으로 예상된다. 따라서 도통손실 및 스위칭 손실 사이의 Trade-off가 발생할 것으로 예상된다.

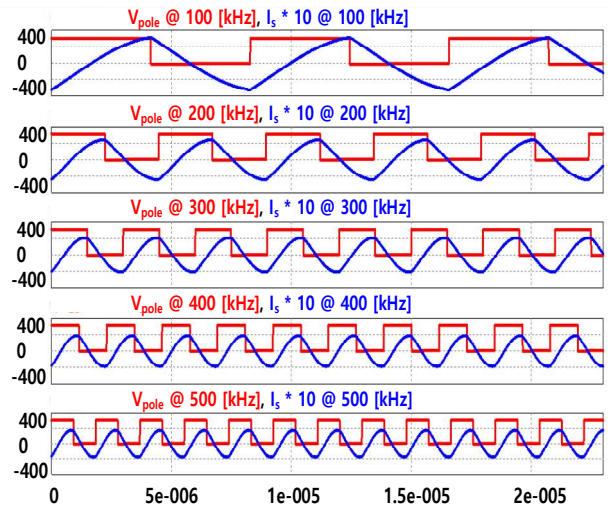


그림 3 주파수에 따른 시뮬레이션 파형 (@ 3.2kW)
Fig. 3 Simulation waveform according to frequency ranges.

표 3 Trade-off 분석을 위해 선정된 전력 반도체 소자

Table 3 Power semiconductor devices for trade-off analysis

Component	Si-MOSFET	SJ-MOSFET	GaN-HEMT
Module	IXTK102N65X2	IPL60R060CFD7	LMG3410R070
$V_{DS,Rated}$ [V]	650	650	600
$I_{D,Rated}$ [A]	102	40	40
$R_{ds(on)}$ [m Ω]	30	48	70
Q_g [nC]	33	28	2.6

전력 반도체 소자에 따른 Trade-off 분석을 위한 손실 비교 분석을 위해 선정된 전력 반도체 소자는 표 3과 같다. GaN-HEMT와 동일한 패키지를 갖는 SJ-MOSFET IPL60R060CFD7은 동작 가능한 주파수 대역의 한계로 인해 200kHz까지만 비교한다. 따라서 200kHz 이후 주파수 대역에서의 Si-MOSFET의 손실 양상의 비교를 위해 고전력 밀도 측면에서는 불리하지만 IPL60R060CFD7에 비해 상대적으로 고주파 및 대전력 어플리케이션에 적용되는 Si-MOSFET인 XYX社 IXTK102N65X2 (TO-264)을 추가로 선정하여 비교한다. GaN-HEMT는 표 3를 통해 볼 수 있듯이 Si-MOSFET에 비해 $R_{ds(on)}$ 은 낮으나 스위칭 손실 측면에서 유리한 특성을 갖는 Ti社의 LMG3410R070을 선정하여 손실 분석을 진행한다.

식 (3)-(6)을 토대로 계산한 주파수 및 전력 반도체 소자 별 전력변환장치의 효율은 그림 4와 같다. 앞서 분석한 바와 같이 200kHz 미만의 영역에서는 P_{diode} 및 P_{cond} 의 비중이 상대적으로 크기 때문에 소자의 $R_{ds(on)}$ 및 V_F 에 지배적인 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 따라서 100-200kHz 구간에서는 가장 낮은 $R_{ds(on)}$ 특성을 갖는 IXTK102N65X2가 가장 높은 효율을 갖으며 스위칭 특성이 우수한 LMG3410R070에 비해 SJ-MOSFET이 높은 효율을 갖는다. 하지만 200kHz 이상의 영역에서는 스위칭 손실의 비중이 점차 증가함으로써 스위칭 특성을 나타내는 Q_g 에 의해 효율 차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 스위칭 특성이 우수한 LMG3410R070이 500kHz 이상의 주파수 대역에서 가장 높은 효율을 갖을 것으로 예상되며 200-500kHz 주파수 대역에서는 Si-MOSFET 적용 시의 효율이 더 낮다. 분석 결과를 통해 높은 GaN-HEMT의 적용이 전체 주파수 영역에서 유리하지 않을 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 Anyplace induction cooktop 설계 시의 전력 반도체 소자는 동작 주파수 영역에 따른 그림 5와 같은 Trade-off를 필수적으로 고려하여 설계해야 한다.

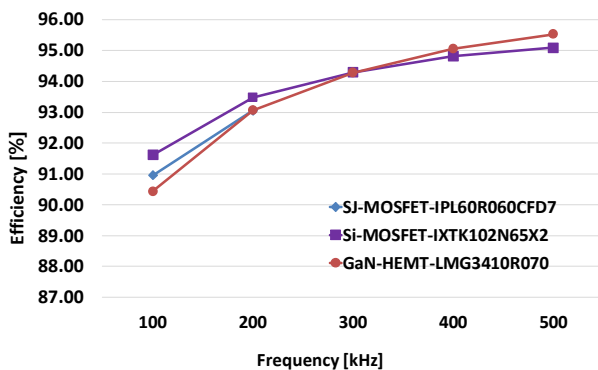
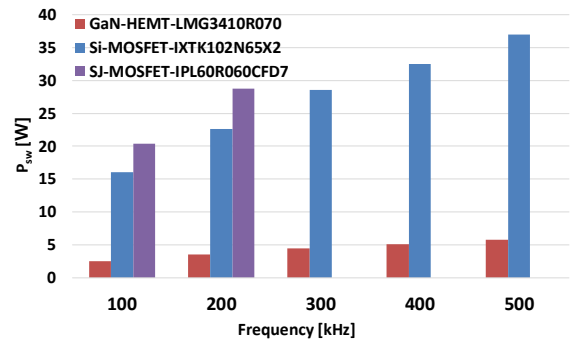
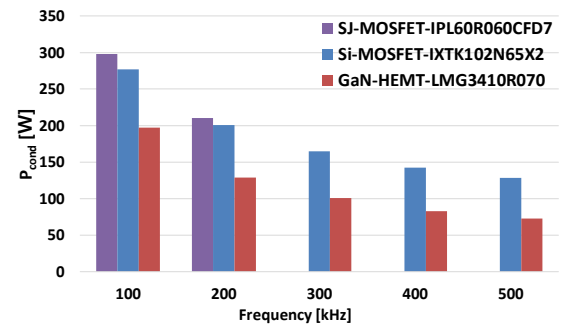


그림 4 주파수에 따른 전체 시스템 효율

Fig. 4 Total System efficiency according to output power.



(a) 스위칭 손실



(b) 스위치 및 다이오드 도통손실

그림 5 주파수에 따른 시스템 손실

Fig. 5 Power dissipations according to frequency ranges.

3. 결론

본 논문에서는 Anyplace Induction Cooktop의 동작 주파수 별 전체 시스템에서 발생하는 손실을 비교 분석함으로써 전력 반도체 소자에 따른 적합한 동작 주파수 영역을 제시하였다. 동작 주파수에 따라 공진 네트워크를 설계하였으며 시뮬레이션 결과를 토대로 전체 시스템의 손실을 수학적으로 계산하였다. 이를 통해 Si-MOSFET 및 GaN-HEMT 소자 적용 시의 시스템의 손실 및 부피 간 Trade-off 분석을 진행하였다.

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

참고 문헌

- [1] T. Hirokawa, E. Hiraki, T. Tanaka, M. Imai, K. Yasui and S. Sumiyoshi, "Dual-frequency multiple-output resonant soft switching inverter for induction heating cooking appliances", *IEEE, IECON 2013*, Vienna, Austria Nov. 2013.
- [2] E. S. Jang, S. M. Park, D. M. Joo, H. M. Ahn, and B. K. Lee, "Feasibility study on All Metal Induction Cooker Systems considering topology and control", *IEEE, ECCE 2018*, Portland, OR, USA, Sept. 2018.
- [3] G. Farkas, Z. Sarkany and M. Rencz, "Issues in testing advanced power semiconductor devices", *IEEE, SEMI-THERM 2016*, San Jose, CA, USA, Mar. 2016.