

GaN-HEMT 기반 AC/DC 전력 변환 회로 설계를 위한 설계 자동화 툴 개발

최홍석, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구실

Development of GaN based AC/DC Power Conversion System Design Tool

Hongseok Choi, Younghoon Cho
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

본 논문에서는 GaN-HEMT 기반 AC/DC 전력 변환 회로 설계를 위한 설계 자동화 툴 개발에 대해 다룬다. 차세대 WBG 전력용 반도체인 GaN-HEMT 소자는 고전압, 고온, 고속 스위칭에 강점이 있으며 AC/DC 전력 변환 회로에 적용시 고전력밀도, 고효율 달성에 유리하다. GaN-HEMT 기반 AC/DC 컨버터 설계를 위한 수식 기반 손실 분석을 진행하고 이를 바탕으로 설계 툴을 제작한다. 설계 툴에 따라 Boost PFC 컨버터와 토템폴 컨버터 제작 후 실험을 통해 설계 툴을 검증한다.

1. 서 론

차세대 전력용 반도체인 GaN-HEMT(Gallium-Nitride High Electron Mobility Transistor)는 WBG(Wide Band Gap) 소자로 기존 Si 기반 MOSFET과 대비하여 우수한 전기적 특성을 가지고 있다. 고전압, 고온, 높은 스위칭 주파수를 견딜 수 있어 전력변환장치의 고전력밀도 및 고효율 달성에 기여하고 있다. 하지만 고속 스위칭 동작은 GaN-HEMT의 스위칭 손실을 증가시키기 때문에 전력변환회로 설계 시 스위칭에 발생하는 손실 분석이 진행되어야 한다. 본 논문은 수식 기반 손실 분석을 이용하여 AC/DC 컨버터 설계 툴을 제작하고 실험을 통해 타당성을 검증한다.^[1]

2. AC/DC 전력 변환 회로 설계 툴 개발

2.1 절 AC/DC 컨버터 회로 설계

수식 기반 AC/DC 컨버터 회로 설계를 위해서 토폴로지와 설계 제정수에 따른 고려가 필요하다. 본 논문에서는 대표적으로 1kW급, 3kW급 부스트 PFC 컨버터와 토템폴 PFC 컨버터에 대하여 회로 설계를 진행한다. 그림 1은 부스트 PFC 컨버터와 토템폴 회로를 보여준다. 부스트 PFC 컨버터는 전파 정류 다이오드를 이용한 토폴로지이며, 토템폴 PFC 컨버터는 GaN-HEMT로 구성된 고주파 스위칭 레그와 다이오드로 구성된 저주파 스위칭 레그로 이루어진 토폴로지이다.

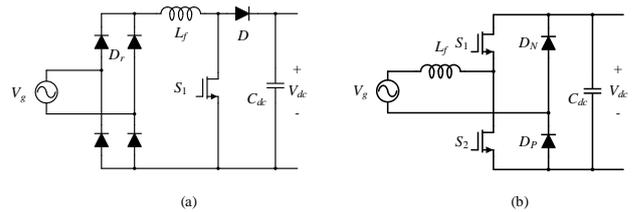


그림1 (a) 부스트 PFC 컨버터 (b) 토템폴 PFC 컨버터
 Fig.1 (a) Boost PFC converter (b) Totempole PFC converter

표 1 부스트 및 토템폴 PFC 컨버터 설계 제정수

Table 1 Design parameters of Boost and Totempole PFC

Parameter		
Output power, P_o [W]	1000	3000
Input voltage, V_{in} [V _{rms}]	220	220
Output voltage, V_{dc} [V]	400	400
Filter inductance, L_f [μ H]	717	239
DC link Capacitance, C_{dc} [μ F]	331	995
Switching frequency, f_{sw} [kHz]	50	50

표 1은 1kW급, 3kW급 AC/DC 컨버터 설계 제정수이다. 필터 인덕턴스는 스위칭 주파수 50kHz 조건에서 전류 리플이 인덕터 전류의 30% 이내에 발생하도록 선정하였다. 직류 링크 커패시터는 전압 리플이 20V 이내에 발생하는 커패시턴스를 선정하여 설계 제정수에 반영하였다.

2.2 절 AC/DC 컨버터 손실 분석 및 설계 툴 제작

부스트 PFC 컨버터와 토템폴 PFC 컨버터의 손실 분석을 진행하고 설계 툴을 제작하였다. 부스트 PFC 컨버터 손실 분석을 위해 정류 다이오드의 도통 손실, GaN 도통 및 스위칭 손실, 부스트 다이오드 도통 손실, 인덕터에 발생하는 손실을 수식적으로 모델링하였다. 또한, 토템폴 PFC 컨버터 손실 분석을 위해 GaN 도통 및 스위칭 손실, 다이오드 도통 손실, 데드타임 손실, 자성소자 손실을 유도하였다. 그 결과 그림 2와 같이 EXCEL 기반으로 작성한 AC/DC 컨버터 설계 툴을 제작하였다. 설계 툴은 시스템 사양에 따라 설계 제정수를 도출하고 소자에 발생하는 손실 계산을 통해 예상 효율 결과값을 제공한다.

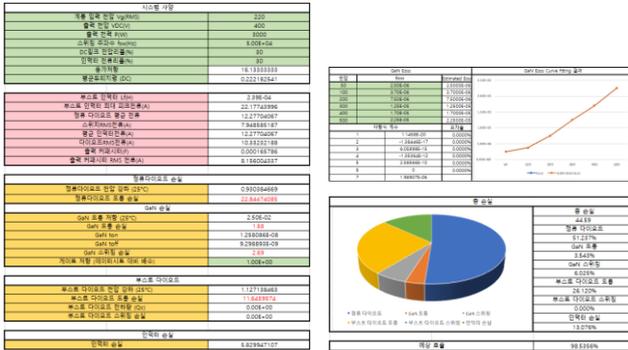


그림2 AC/DC 컨버터 설계 툴
Fig.2 AC/DC converter Design Tool

표 2 설계 툴을 이용한 부스트 PFC 컨버터 손실 분석

Table 2 Loss analysis of Boost PFC converter using Design Tool

출력 전력	1000 W	3000 W
정류 다이오드 도통 손실 [W]	6.74	22.84
GaN 도통 손실 [W]	0.18	1.58
GaN 스위칭 손실 [W]	2.69	2.69
부스트 다이오드 도통 손실 [W]	3.92	11.65
총 손실 [W]	13.52	38.76

표 3 설계 툴을 이용한 토템폴 PFC 컨버터 손실 분석

Table 3 Loss analysis of Totempole PFC converter using Design Tool

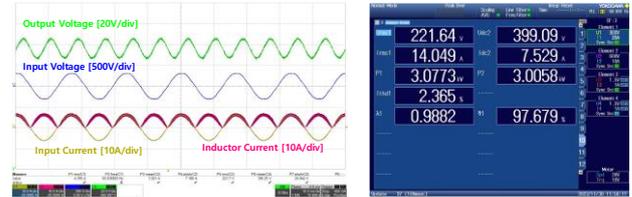
출력 전력	1000 W	3000 W
GaN 도통 손실 [W]	2.63	23.69
GaN 스위칭 손실 [W]	5.37	5.37
다이오드 도통 손실 [W]	7.31	21.74
데드타임 손실 [W]	0.20	0.61
총 손실 [W]	15.52	51.41

3. 실험결과

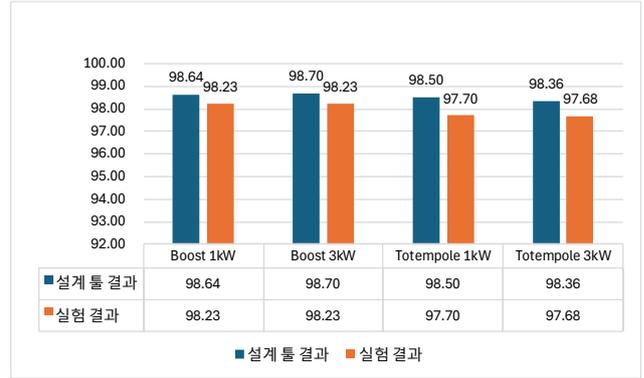
그림 2는 GaN Systems 社 GS66516B와 Little fuse 社 LSIC2SD065A20A 소자를 이용하여 제작한 Boost PFC 컨버터와 토템폴 PFC 컨버터이다. 그림 3은 실험을 통해 효율을 측정하고 그 결과를 예상 효율과 비교한 결과이다. 최대 오차는 토템폴 PFC 컨버터 1kW 조건에서 0.80%이며, 최소 오차는 부스트 PFC 컨버터 1kW 조건에서 0.41%이다. 실험을 통해 측정된 효율은 설계 툴을 이용한 예상 효율과 유사한 결과임을 확인할 수 있다.



그림2 3kW급 AC/DC 컨버터 하드웨어 (a) 부스트 PFC 컨버터 (b) 토템폴 PFC 컨버터
Fig.2 3kW AC/DC converter (a) Boost PFC converter (b) Totempole PFC converter



(a) (b)



(c)

그림3 (a) 부스트 PFC 컨버터 실험파형 (b) 토템폴 PFC 컨버터 효율 (c) 실험 결과와 설계 툴 결과 비교 그래프

Fig.3 (a) Boost PFC converter experiment waveform (b) Totempole PFC converter efficiency (c) Efficiency graph comparing experimental results with Design Tool results

4. 결론

본 논문에서는 GaN-HEMT 기반 부스트 PFC 컨버터와 토템폴 PFC 컨버터 수식 기반 설계 자동화 툴을 제작하였다. 설계 툴의 유효성을 검증하기 위해 컨버터를 제작하고 실험 조건을 변경하며 실험 데이터를 추출하였다. GaN-HEMT 및 다이오드에서 발생하는 손실을 이용하여 예상 효율 도출하고 실험을 통해 실제 효율 결과와 비교하여 설계 자동화 툴의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20210501010020)

참고 문헌

[1] 김준형, 그리고 권용성, “저전력 시스템에서 GaN HEMT와 Si MOSFET의 전력 손실 분석”, 한국산학기술학회 논문지, 23(9), 8-15, 2022

[2] R. Hou, Y. Shen, H. Zhao, H. Hu, J. Lu and T.Long, “Power Loss Characterization and Modeling for GaN-Based Hard-Switching Half-Bridges Considering Dynamic on-State Resistance,” IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol.6, no. 2, pp. 540-553, June 2020.