

GaN HEMT를 적용한 3kW급 LLC 공진형 컨버터 설계

임종헌, 주동명, 현병조, 김진홍, 최준혁
전자부품연구원 지능메카트로닉스 연구센터

Design of 3kW LLC Resonant Converter Based on GaN HEMT

Jong-Hun Lim, Dongmyoung Joo, Byoung Jo Hyon, Jin-Hong Kim, Jun-Hyuk Choi
Korea Electronics Technology Institute (KETI)

ABSTRACT

본 논문은 차세대 전력반도체 GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor)를 적용한 통신전원 시스템용 LLC 컨버터의 설계에 대해 다룬다. GaN HEMT 소자의 노이즈를 저감하기 위해 3-level 게이트 드라이버를 설계하였다. 설계한 게이트 드라이버와 GaN HEMT를 적용한 3kW급 LLC 공진 네트워크를 설계하였고, 테스트 베드를 제작하여 실험을 통해 시스템의 성능을 검증하였다.

1. 서 론

공진형 컨버터는 ZVS(Zero-Voltage Switching)을 통한 고효율 특성으로 인해 적용분야가 점차 확대되고 있다^[1]. 이에 더해 스위칭 손실이 적은 차세대 전력반도체 GaN HEMT를 적용하여 1차 측의 턴-오프 스위칭 손실을 저감시켜 높은 시스템 효율과 전력밀도를 기대 할 수 있다. 하지만 GaN HEMT 소자는 높은 dv/dt 및 di/dt 특성으로 드라이빙 시 게이트 드라이버가 노이즈에 노출되기 쉽다. 또한 반도체의 문턱전압(V_{th})이 Si-MOSFET에 비해 낮기 때문에 게이트에 작은 노이즈에도 비정상적인 스위칭이 일어난다는 문제점이 있다. 이러한 문제점들을 해결하고 나아가 안정적인 스위칭 동작을 위해 3-level 게이트 드라이버를 적용하였다.

본 논문에서는 차세대 전력반도체 GaN HEMT를 적용하기 위한 게이트 드라이버 설계 및 통신전원부 3kW급 LLC 공진형 컨버터 설계과정을 다루며 테스트 베드를 통한 시스템 성능 검증을 통해 설계 타당성을 입증한다.

2. 본 론

2.1 GaN HEMT 게이트 드라이버

Infineon社의 GaN HEMT의 경우 공정 시 pGaN 게이트 접합 방식을 이용하기 때문에 MOSFET과는 다른 동작 특성을 보인다. 기존 GaN HEMT의 Normally-on 게이트를 off 특성으로 바꾸기 위한 방식으로, 게이트에 ON 전압이 인가되었을 때 연속적인 전류가 흐르는 것이 특징이다. 그림 1-(a)는 E-mode (Enhancement - mode) GaN의 등가회로를 나타내며 GS 단에 다이오드를 통해 V_F 전압이 인가되었을 때 전류가 연속적으로 흐르게 된다.

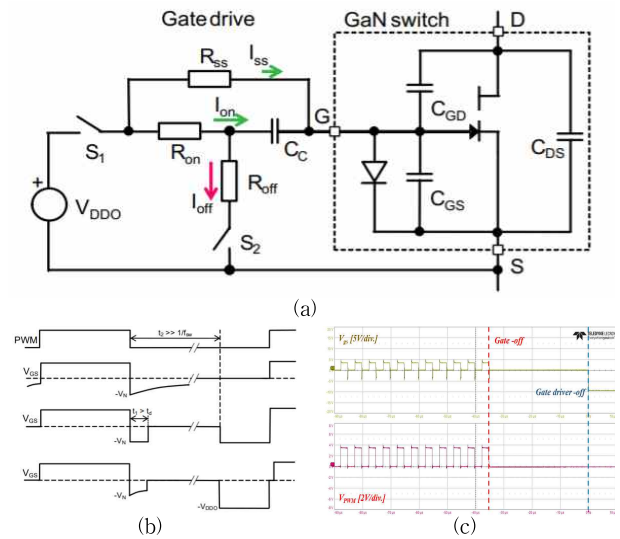


그림 1 (a) GaN HEMT 스위치 및 게이트 드라이버 등가회로^[2]
(b) 게이트 드라이버 권장 동작파형^[2] (c) 게이트 드라이버 동작
Fig 1 (a) GaN HEMT Switch and Gate driver equivalent circuit
(b) Recommend Gate driver operating Waveform (c) Gate Driver operating

그림 1-(a)는 Infineon社의 GaN 게이트 드라이버 등가회로를 나타낸다. Bridge 구조의 동시 도통을 방지하기 위해 양극성 게이트 전압을 이용한다. 게이트 ON 동작시 S1이 도통되고 R_{on} 을 통해 게이트가 턴 온 되지만, 연속적인 도통 전류를 위해 R_{ss} (Steady-state Resistor)를 추가적으로 배치한다.

그림 1-(b)는 GaN 게이트 드라이버의 권장 동작 파형으로 양극성 드라이빙시 S2가 도통되어 off 전압이 인가되고 C_c (Coupling Capacitor)의 전압이 방전된 후 S2가 off상태가 되고 영 전압으로 유지된다. 동특성 off 전압은 식 1과 같이 나타낼 수 있다. 이와 같이 3-level 드라이빙을 하는 이유는 pGaN 게이트 Bridge 구조에서 Faulty Turn-on을 방지하기 위함이다.

$$-V_N = \frac{C_c \times (V_{DDO} - V_F) - Q_{Deq}}{C_c + C_{GS}} \quad \text{식 - (1)}^{[2]}$$

그림 1-(c)는 게이트 드라이버 동작 파형으로 그림 1-(b)와 같이 3-level의 전압으로 동작하는 것을 확인할 수 있으며 턴-오프시에 $-V_{DDO}$ 가 인가되어 Normally-off 동작을 확인할 수 있다.

2.2 LLC 공진형 컨버터 설계

표 1은 통신 전원부의 입출력 파라미터이다. 입출력 전압 비를 고려하여 입력전압 415 V일 때 출력전압이 54 V가 되도록 전압이득 곡선을 이용해 컨버터 파라미터를 선정하였다. 그림 2와 같이 동작 주파수는 최대 동작주파수가 200 kHz 부근에 위치하도록 하고, 공진주파수는 160kHz가 되도록 설계하였다. 최종적으로 표 2와 같이 설계하였다.

표 1 LLC 공진형 컨버터 입출력 파라미터

Table 1 LLC Resonant Converter Input Output Parameter

파라미터	값	단위
입력 전압	342~435	V
출력 전압	43~58	V
최대 출력 전류	62.5	A
최대 출력	3000	W

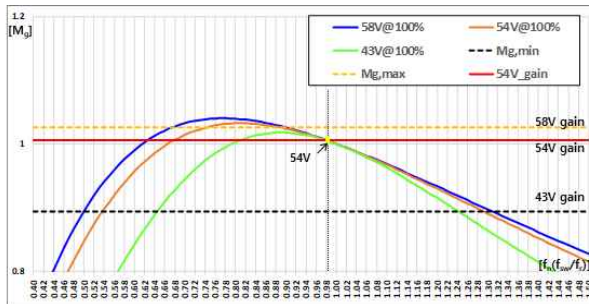


그림 2 LLC 공진형 컨버터 전압 이득 곡선

Fig 2 Designed Resonant Frequency and Voltage Gain Graph

파라미터	값	단위
공진 주파수	160	kHz
권선 비	23 : 3	Turns
$L_r(L_{lkg} + L_{ext})$	23.5 (9.5 + 14)	μ H
L_m	160	μ H
C_r	42	nF

표 2 LLC 공진형 컨버터 설계 파라미터

Table 2 LLC Resonant Converter Design Parameter

3. 실험 결과

표 2에 나타낸 설계 파라미터를 기반으로 테스트 베드를 제작하였다. 1차측 GaN HEMT는 Infineon社の IGT60R070D1 (600V, 20A, 70mOhm)을 사용하였고 그림3-(b)와 같이 Metal PCB 아트웍을 통해 파워 보드의 방열 성능을 높였다. 2차 측 다이오드의 경우 동기정류 방식의 동작을 고려하여 Si-MOSFET을 사용하였으며 Infineon社の IPP020N08N5 (80V, 120A, 2mOhm)을 선정하였다.

제작된 테스트 베드를 이용하여 입력전압 380V, 출력전압 54V의 조건으로 부하실험을 수행하였다. 그림 3은 제작된 테스트 베드 외관과 1.2, 2.7kW 부하의 오실로스코프 동작 파형을 나타낸다. 그림 3-(c),(d)와 같이 GaN HEMT의 V_{DS} 전압과 변압기 1차 측 전류를 측정하여 스위치의 ZVS 동작을 확인할 수 있었다. 또한 공진 주파수 동작 영역에서 2차 측 Si-MOSFET의 V_{DS} 전압과 변압기 2차 측 전류를 측정하여 스위치의 ZCS (Zero-Current Switching) 동작을 확인할 수 있었다. 최종적으로 그림4와 같이 최대효율 97.1%를 달성하였다.

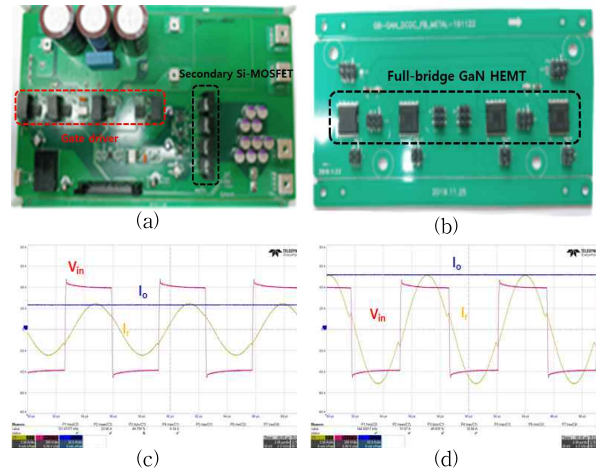


그림 3 (a) 테스트 베드 아웃라인 (b) 테스트 베드 1차 측 파워 보드 (c) 1.2kW 출력 파형 (d) 2.7kW 출력 파형

Fig 3 (a) Test bed Board Outline (b) Test bed Power Board Outline (c) 1.2kW Output Waveform (d) 2.7kW Output Waveform

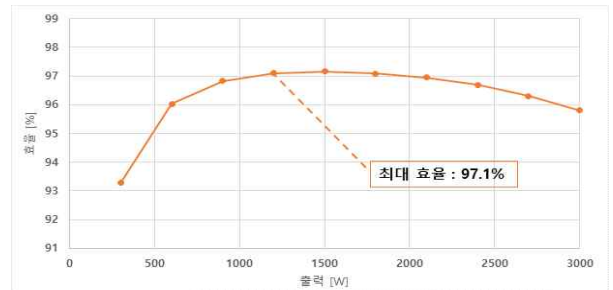


그림 4 LLC 공진형 컨버터의 부하별 효율 곡선

Fig 4 Designed LLC Resonant converter Load Efficiency Graph

4. 결론

본 논문에서는 GaN HEMT를 적용하여 이동통신망용 통신전원부 3kW급 고효율 LLC 공진형 컨버터를 설계과정에 대해 다룬다. GaN HEMT 노이즈에 의한 문제점을 해결하기 위하여 3-level 게이트 드라이버를 설계하였고, 게이트 드라이버를 테스트 베드 적용결과 Full-bridge LLC 구조에서 ZVS 및 ZCS 동작을 확인하여 설계의 타당성을 검증할 수 있었다. 또한 부하실험에서 시스템 효율 측정 결과 최대 97.1%의 효율을 달성하여 GaN HEMT의 고효율 특성을 확인할 수 있었다.

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20192010106690)

참고 문헌

- [1] Byong-Chul So, "Design of LLC Resonant Converter having Enhanced Load Range for Communication Power": The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 17, No.5, pp461-469, October 2012
- [2] [online] https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1EDF5673FDS-v02_01-EN.pdf?fileId=5546d46266a498f50166c9b590b52264