

GaN FET을 이용한 토렘폴 구조의 브리지리스 부스트 PFC 컨버터

장바울, 강상우, 조보형, 서한솔*, 김진한*, 박현수*
서울대학교, 삼성전자*

Totem-pole bridgeless boost PFC Converter Based on GaN FETs

Paul Jang, Sangwoo Kang, Bohyung Cho, Hansol Seo*, Jinhan Kim*, Hyunsoo Park*
Seoul National University, Samsung Electronics*

ABSTRACT

본 논문에서는 Si MOSFET 대비 GaN FET의 특성을 비교·분석하고, GaN FET의 장점을 활용할 수 있는 방안을 모색하였다. 그 결과 GaN FET의 우수한 reverse recovery 특성을 활용할 수 있는 토렘폴 구조의 브리지리스 부스트 PFC 컨버터를 선정하였고, 선정된 회로의 동작 및 효율을 5.5kW급 프로토타입을 통하여 확인하였다.

1. 서론

Gallium Nitride (GaN) FET은 wide band gap (WBG) 반도체가 가지는 특징으로 인해 기존 Silicon (Si) 반도체 소자에 비해 상대적으로 낮은 도통 저항 값과 작은 소자 커패시턴스 값을 갖는다. 또한 뛰어난 스위칭 특성으로 인해 전력변환장치의 고주파 구동에 유리한 특성을 갖는다. 이에 본 논문에서는 Si MOSFET 대비 GaN FET의 특성을 비교·분석하고 GaN FET을 우수성을 활용할 수 있는 방안을 모색하였다. 그 결과 토렘폴 구조의 부스트 브리지리스 PFC 컨버터를 선정하였고, 프로토타입 제작을 통해 연속 도통 모드로 동작하는 5.5kW급 토렘폴 구조 브리지리스 부스트 PFC 컨버터의 성능을 확인하였다.

2. GaN FET과 Si MOSFET의 비교

GaN FET의 우수성을 확인하기 위하여 Si MOSFET과의 소자 특성을 비교하여 표 1에 정리하였다. 소자는 개발할 프로토타입의 조건에 따라 650V내외의 정격을 선정 기준으로 선정되었으며, 표 1의 내용은 GaN FET, Si MOSFET 각각 R_{DS(on)}과 Q_{rr}의 데이터시트로부터 참조하였다.

비교 결과 대부분의 항목에서 GaN FET이 Si MOSFET에 비해 좋은 특성 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이 중 특히 주목해서 보아야 할 항목은 reverse recovery time (T_{rr}) 과 reverse recovery charge (Q_{rr}) 으로 이들의 경우 GaN FET이 Si MOSFET에 비해 현저히 작은 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이상으로 T_{rr} 및 Q_{rr} 값이 매우 작다는 사실을 이용함으로써 GaN FET의 우수성을 가장 효과적으로 드러낼 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

3. 토렘폴 브리지리스 부스트 PFC

표 1 GaN FET과 Si MOSFET의 비교

Table 1 Comparison between GaN FET and Si MOSFET

Parameter	GaN FET	Si MOSFET
V _{DS}	650V	700V
I _D	30A (at 25°C)	43.3A (at 25°C)
R _{DS}	45mΩ	72mΩ
T _r	8ns (V _{DS} =400V, I _D =20A)	18ns (V _{DS} =400V, I _D =26.3A)
T _f	5ns (V _{DS} =400V, I _D =20A)	6ns (V _{DS} =400V, I _D =26.3A)
E _{ON} /E _{OFF}	20μJ/30μJ (V _{DS} =400V, I _D =20A)	
T _{rr}	12ns (V _{DD} =400V, I _F =20A, di/dt=1000A/μs)	180ns (V _{DD} =400V, I _F =26.3A, di/dt=100A/μs)
Q _{rr}	37nC (V _{DD} =400V, I _F =20A, di/dt=100A/μs)	1μC (V _{DD} =400V, I _F =26.3A, di/dt=100A/μs)

Half bridge 구조에서는 특정 스위치의 턴 오프 동작 때 발생하는 reverse recovery charge에 의해 손실이 발생할 수 있다. 따라서 GaN FET의 좋은 reverse recovery 특성을 이용하여 효율 및 회로의 신뢰성을 개선할 수 있는 여지가 있다. AC DC 컨버터에서 half bridge 구조를 활용하고 있는 예가 바로 그림 1의 토렘폴 부스트 브리지리스 PFC 회로이다.

토렘폴 부스트 브리지리스 PFC 회로는 도통 손실이 작고, common mode EMI 특성이 좋지 않지만^[1], 기존 Si MOSFET을 이용해서는 CCM으로 사용할 수 없었는데 이는 바로 Si MOSFET body diode의 reverse recovery 문제 때문이었다^[2]. 즉, reverse recovery charge가 효율 및 회로의 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있으므로 불연속 도통 모드 및 임계 도통 모드로만 동작할 수 있었다. 반면 GaN FET은 reverse recovery charge가 현저히 작기 때문에 연속 도통 모드로도 동작이 가능하며 대용량 응용에서도 토렘폴 브리지리스 방식을 가능케 한다.

3.1 회로 구성

그림 1은 인터리브드 토렘폴 브리지리스 부스트 PFC의 회로도를 나타낸다. 5.5kW의 용량에서 고효율을 달성하기 위해

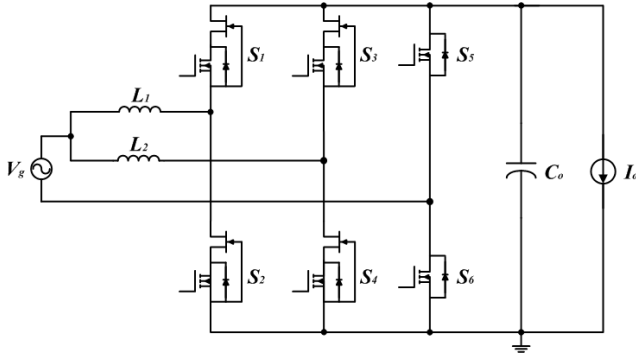


그림 1 인터리브드 토템폴 브리지리스 부스트 PFC
Fig. 1 Interleaved totem-pole bridgeless boost PFC

서 2개 모듈의 interleaving 구조를 선택하였다. 회로는 교류 입력 전원에 연결된 인덕터 (L_1, L_2), GaN FET (S_1, S_2, S_3, S_4), 60Hz 동기 MOSFET (S_5, S_6) 와 출력 커패시터 (C_o) 으로 구성되어 있다.

3.2 동작 특성

인터리브드 토템폴 브리지리스 부스트 PFC에서는 두 leg에 스위칭 소자(S_1, S_2, S_3, S_4) 를, 다른 한 leg에 60Hz 동기 스위칭 소자 (S_5, S_6) 를 위치시킨다. 이로써 교류 입력 전원이 양일 때는 AC side ground가 DC side ground에, 교류 입력 전원이 음일 때는 AC side ground가 DC side 양전위 부분에 연결된다. 따라서 AC side ground 와 DC side ground 사이에는 60Hz의 사각파 전압이 형성되므로 CM noise 특성이 개선된다. 또한 추가 소자가 필요하지 않고 도통 경로의 반도체 소자 역시 conventional 브리지리스 방식과 동일하므로 높은 효율을 달성할 수 있다. 반면 high side에 위치한 스위치를 구동하기 위해서 추가 gate 구동 회로가 필요하다.

3.3 제어 전략

본 실험에서는 경부하에서의 효율 향상을 위하여 기본 제어 전략이외에 phase shedding 알고리즘을 추가하였다.

4. 실험 결과

선정한 회로의 동작을 검증하기 위해 컨버터를 설계하고 실험을 수행하였다. 컨버터의 설계 조건은 $V_g = 220V$ AC (60Hz), $V_o = 380V$, $P_o = 5.5kW$ 로 정하였으며 이에 따른 설계 사항은 $L_1, L_2 = 800\mu H$, $C_o = 680 \times 4\mu F$, $f_s = 30kHz$ 이다. 회로의 제어 알고리즘은 TI 社의 digital signal processor (DSP) 인 TMS32F28335를 이용해 구현해 주었다.

그림 2는 5.5kW 부하에서 입력 전압과 입력 전류의 파형을 나타낸다. 5.5kW 부하에서 측정된 역률은 0.998로 PFC가 정상적으로 동작하고 있음을 알 수 있다.

그림 3은 부하에 따른 효율 곡선이다. Stand alone 모드에서 측정 최고 효율은 부하전류 4A에서 98.7%이다. 측정된 데이터를 바탕으로 phase shedding 알고리즘은 4.5A에서 적용하였다.

5 결론

본 논문에서는 Si MOSFET 대비 GaN FET의 특성을 비교·분석하고, GaN FET이 reverse recovery 특성에 가장 큰 장

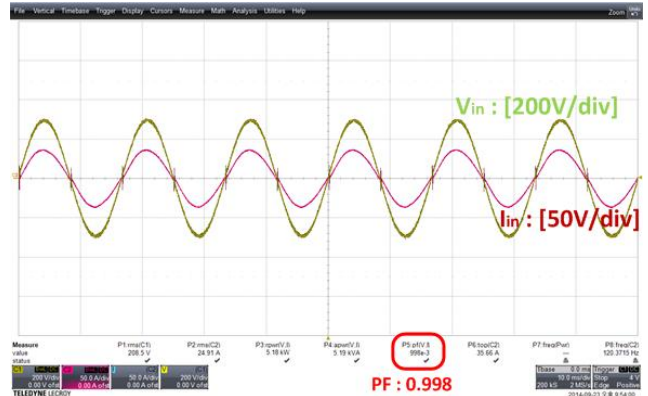


그림 2 정격부하 (5.5kW)에서의 입력 전압 및 입력 전류 파형
Fig. 2 Input voltage and input current waveform under the rated power (5.5kW)

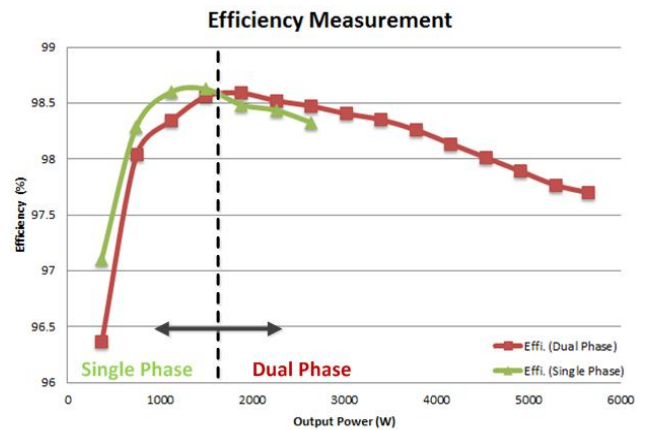


그림 3 효율 곡선
Fig. 3 Efficiency

점을 가지고 있음을 확인하였다. 이에 GaN FET을 우수성을 활용할 수 있는 방안의 일환으로 토템폴 브리지리스 부스트 PFC 컨버터를 선정하였다. 선정된 회로는 프로토타입으로 제작되었고, 연속 도통 모드로 동작하는 5.5kW급 토템폴 구조의 브리지리스 부스트 PFC 컨버터의 동작 및 효율을 확인하였다.

이 논문은 삼성전자의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Qingnan Li, Michael A. E. Andersen and Ole C. Thomsen, "Conduction losses and common mode EMI analysis on Bridgeless Power Factor Correction," International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), pp. 1255 1260, 2009.
- [2] L. Huber, Y. Jang, and M. M. Jovanovic, "Performance evaluation of bridgeless PFC boost rectifiers," IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 3, pp. 1381 1390, May 2008.