

# GaN-HEMT를 적용한 부스트 컨버터의 손실 분석

김재민, 양형규, 주동명, 노용수, 최준혁<sup>†</sup>  
 한국전자기술연구원 전력제어시스템 연구센터

## Power Loss Analysis of Boost Converter using GaN-HEMT

JaeMin Kim, HyoungKyu Yang, DongMyoung Joo, Yong-Su Noh, Jun-Hyuk Choi<sup>†</sup>  
 Power System Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI)

### ABSTRACT

본 논문에서는 GaN-HEMT(Gallium Nitride-High Electron Mobility Transistor) 소자를 적용한 컨버터의 손실 분석에 대해 다룬다. GaN-HEMT 소자는 기존 Si 계열의 소자에 비해 넓은 높은 스위칭이 가능하기 때문에 고효율/고밀도 컨버터 설계가 가능하다. 본 논문에서는 GaN-HEMT 소자를 적용한 컨버터의 설계기법 개발을 위한 손실 분석기법에 대해 다루며, GaN-HEMT를 적용한 3kW급 부스트 컨버터 시작품의 실험을 통해 손실 분석 및 포화온도 추정에 대한 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

최근 전력전자 관련 산업이 고도화됨에 따라 고전력밀도 및 고효율을 갖는 전력변환장치의 수요가 증가하고 있다. 그러나 기존 Si 기반의 전력 반도체 소자는 이론적으로 예측되는 성능 한계에 달한 상황으로, 전력변환장치의 효율 향상 및 소형화 설계 등 성능 개선이 어려운 상황이다. 따라서 최근에는 기존 MOSFET의 단점을 보완하기 위해 에너지 밀도를 극대화할 수 있는 WBG(Wide-Band-Gap)기반의 전력 반도체 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 GaN-HEMT(Gallium Nitride-High Electron Mobility Transistor)는 낮은  $R_{DSon}$  및 빠른 전자기동으로 인해 고속 스위칭이 가능하기에 차세대 전력 반도체 소자로 주목받고 있다. 기존 Si 전력 반도체에 비해 고속 스위칭이 가능한 GaN-HEMT를 적용함으로써 동일한 전류 리플 조건에서 인덕터 등 수동소자를 작은 값으로 설계할 수 있기 때문에 이는 컨버터의 전력 밀도 및 효율 향상에 기여할 수 있다. 하지만 고주파 스위칭 동작 시 증가하는 스위칭 손실로 인해 최적 설계를 위한 스위칭 손실 분석이 필요하며, 본 논문에서는 수식 기반의 손실 분석과 시작품의 실험을 통해 타당성을 검증한다.

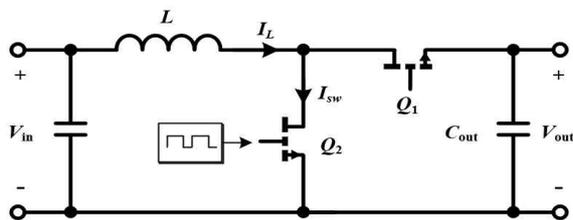


그림 1. 부스트 컨버터의 구성.  
 Fig. 1. Configuration of Boost Converter using GaN-HEMT.

### 2. GaN-HEMT를 적용한 DC/DC 부스트 컨버터

#### 2.1 부스트 컨버터의 회로 구성

GaN-HEMT를 적용한 부스트 컨버터의 구성은 그림 1과 같다. 스위치  $Q_1$ ,  $Q_2$ 는 전력 반도체 GaN-HEMT 스위치이며, 입력전압  $V_{in}$ 을 스위치  $Q_2$ 의 듀티비  $D$ 에 따라 출력전압  $V_{out}$ 을 제어한다. 스위치  $Q_2$ 가 도통 될 때 인덕터 전압  $V_L$ 은 입력전압  $V_{in}$ 의 값을 가지고, 스위치  $Q_2$ 가 차단되면 인덕터에 흐르는 전류는 스위치  $Q_1$ 을 통해 출력단에 전달되어 출력 커패시터는 충전된다. 인덕터의 전류 리플의 크기  $\Delta I_L$ 는 아래 식 (1)과 같으며, 이를 이용하여 스위치가 턴-온, 턴-오프되는 시점의 전류의 크기( $I_{sw,on}$ ,  $I_{sw,off}$ )는 각각 아래 식 (2)와 같다. 또한 스위치  $Q_2$ 에 흐르는 전류의 실효값  $I_{sw,rms}$ 은 듀티비  $D$ 와 식 (1)을 이용하여 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta I_L = V_{in}DT_{sw}/L \tag{1}$$

$$I_{sw,on} = I_{L,avg} - 0.5 \times \Delta I_L, \quad I_{sw,off} = I_{L,avg} + 0.5 \times \Delta I_L \tag{2}$$

$$I_{sw,rms} = I_{L,avg} \sqrt{D \left( 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta I_L}{I_{L,avg}} \right)^2 \right)} \tag{3}$$

#### 2.2 부스트 컨버터의 손실 분석

부스트 컨버터의 스위치에서 발생하는 손실은 크게 스위칭 손실  $P_{sw}$ 와 도통 손실  $P_{cond}$ 로 나눌 수 있다. 스위칭 손실  $P_{sw}$ 는 소자의  $E_{on}$  또는  $E_{off}$ 를 이용하여 아래 식 (4)와 같이 표현할 수 있다[1-2].

$$P_{sw} = (E_{on} + E_{off}) \times f_{sw} \tag{4}$$

본 논문에서는 소자의 데이터시트를 활용하여 식 (2)를 통해 산출한 스위칭 시점에서의 전류 크기에 따라  $E_{on}$ ,  $E_{off}$  값을 아래 식 (5)를 이용하여 산출하였다.

$$E_{on} = 0.5 \times t_r I_{sw,on} V_{DS}, \quad E_{off} = 0.5 \times t_f I_{sw,off} V_{DS} \tag{5}$$

스위칭의 도통 손실  $P_{cond}$ 은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 스위치에 흐르는 전류 실효값  $I_{sw,rms}$ 은 식(3)을 통해 구할 수 있으며, 등가저항  $R_{DSon}$ 은 스위치가 도통 되어있을 때의 평균값을 이용하여 데이터시트를 통해 산출할 수 있다.

표 1 GaN 기반 부스트 컨버터의 동작 조건.

Table 1 Operating Conditions of GaN-HEMT Boost Converter.

구분	단위	Case A		Case B
		Case A-1	Case A-2	Case B-1
정격용량	[W]	1,000		3,000
전류리플	[%]	50		20
스위칭주파수	[kHz]	200	250	150
동작조건	-	입력:100V <sub>DC</sub> , 출력:200V <sub>DC</sub>		입력:200V <sub>DC</sub> , 출력:300V <sub>DC</sub>

표 2 GaN 기반 부스트 컨버터의 손실 분석 결과.

Table 2 Loss analysis results of GaN-HEMT Boost Converter.

구분	단위	Case A-1		Case A-2		Case B-1	
부하용량	[W]	500	1,000	500	1,000	1,500	3,000
스위치 손실	[Watt]	6.84	16.49	8.05	18.80	14.07	37.25
자성체 손실	[Watt]	0.94	2.03	0.914	2.00	1.57	4.02
총 손실	[Watt]	7.78	18.52	8.97	20.81	15.64	41.27
효율(산출값)	[%]	98.47	98.18	98.24	97.96	98.97	98.64

$$P_{cond} = R_{DS(on)} \times I_{sw,rms}^2 \quad (6)$$

본 논문에서 손실 분석을 수행한 컨버터 동작 조건은 표 1과 같다. 손실 분석의 오차를 확인하기 위하여 스위칭 주파수, 전류 리플 조건을 설정하였으며, 각 컨버터의 정격용량은 1kW(Case A), 3kW(Case B)로 선정하였다. 수식 기반 손실 분석의 정확도 검증에 위해 표 1과 같이 동작 주파수, 인덕터 전류 리플 등의 동작 조건을 가변하여 부하별 손실 값을 도출하였다. 산출된 효율에 반영된 손실은 스위치의 스위칭 손실과 도통 손실, 출력 커패시터 손실, 인덕터의 철손 및 동손 등으로 구성하였고 표 2와 같이 Case A-1, Case A-2, Case B-1별로 부하를 500W, 1000W, 1500W, 3000W로 나누어 손실 및 효율을 산출하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 손실 분석 검증용 시제품 개발

본 논문에서는 손실 분석 검증용 시제품을 그림 2의 입력부, 전력변환부, 제어부로 구분하였으며 입력부는 동작 조건에 따라 변경되는 수동소자(인덕터 등)의 범용적 사용을 위해 단자대를 활용하여 별도 분리 설계하였다. 실험에 적용한 인덕터는 전류 리플을 고려하여 각각 50μH(Case A-1), 40μH(Case A-2), 60μH(Case B-1)로 설계하였다. 전력변환부는 스위칭 시 발생하는 노이즈를 최소화하기 위해 레그 양단에 필름 커패시터를 추가했으며, DC 링크에 최대한 가깝게 배치하였다.



그림 2. 부스트 컨버터의 구성  
Fig. 2. Configuration of Boost Converter using GaN-HEMT

표 3 GaN 기반 부스트 컨버터 실험데이터 비교

Table 3 GaN-HEMT Boost Converter experimental data comparison

구분	단위	Case A-1		Case A-2		Case B-1	
효율(산출값)	[%]	98.47	98.18	98.24	97.96	98.97	98.64
측정효율	[%]	98.385	98.373	98.148	98.175	98.762	98.567
효율오차	[%]	0.08	0.19	0.09	0.21	0.21	0.08

표 4 GaN 기반 부스트 컨버터 온도 실험데이터 비교

Table 4 GaN-HEMT Boost Converter temperature experimental data comparison

구분	단위	Case A-2		Case B-1	
온도 산출값	[°C]	31.24		37.37	
포화 온도	[°C]	28.7		33.1	
오차	[°C]	2.54		4.27	

#### 3.2 실험데이터 비교

손실 분석 검증용 시제품의 실험을 통해 측정된 효율은 표 3과 같다. 실험 결과, 표 2의 수식적으로 산출한 효율과 최대 0.21 %의 오차를 갖는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 방열판 온도를 스위치 손실과 방열판의 열저항 값을 활용하여 수식으로 추정하고, Case A-2, Case B 시제품 실험을 통해 비교하였다. 포화온도는 Case A-2의 경우 31.24°C, Case B-1의 경우 31.24°C로 실제 실험 결과와 Case A-2는 약 2.5°C, Case B-1은 약 4.2°C 차이가 나는 것을 확인하였다. 포화온도의 오차는 실험 환경의 외기온도, 방열 팬의 성능 등에 의하여 오차가 난 것으로 판단된다.

### 4. 결론

본 논문에서는 GaN-HEMT를 적용한 부스트 컨버터를 수식적으로 산출한 손실 분석을 시제품 실험을 통해 실제로 측정된 손실 분석과 온도포화에 대한 측정값으로 오차를 분석하였다. 수식 분석의 정확도를 검증하기 위하여 총 3가지의 경우에서 분석을 수행하고, 이를 실험을 통해 검증하였다. 실험 결과 수식을 통해 산출한 효율 값과 최대 0.21% 차이가 나는 것을 확인하였으며 포화온도의 경우 최대 4.2°C 차이가 나는 것을 확인하였다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800020, 통합형최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

### 참고 문헌

- [1] 한승훈, 양형규, 황대연, 주동명, 최준혁, "GaN HEMT를 적용한 3kW급 LLC 공진형 컨버터의 손실 분석 및 개발" 전력전자학회논문지 pp.533-534, July. 2022
- [2] 이완희, 주동명, 박상민, 현병조, 최준혁, "GaN HEMT를 적용한 3kW급 주택용 태양광 인버터 손실 분석" 전력전자학회논문지 pp.365-366, July. 2021