

GaN HEMT를 적용한 3kW급 동기식 Buck 컨버터 개발

이수연, 양형규, 주동명, 박준성, 김진홍[†]

한국전자기술연구원 전력제어시스템연구센터

Development of 3kW Synchronous Buck Converter using GaN HEMT

Su-Yeon Lee, Hyoung-Kyu Yang, Dongmyoung Joo, Joon Sung Park, Jin-Hong Kim[†]

Korea Electronics Technology Institute Power System Research Center

ABSTRACT

Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor(GaN HEMT)은 낮은 온저항과 빠른 전자 이동도로 스위칭 손실을 최소화할 수 있으며 동기식 Buck 컨버터는 비동기식 대비 도통 손실 및 스위칭 손실이 낮아 효율이 우수하다는 특징이 있다. 따라서 GaN HEMT를 적용한 동기식 Buck 컨버터는 소형화 및 고전력밀도 전원장치에 많이 사용된다. 본 논문은 GaN HEMT 소자를 기반으로 한 동기식 Buck 컨버터 3kW급 시작품을 개발하고 그 효율을 수식적으로 분석하였다.

1. 서 론

Buck 컨버터는 Pulse Width Modulation(PWM)을 제어하여 전압을 효율적으로 강압시키는데 사용되는 일종의 DC-DC 전력 변환기이다. Buck 컨버터의 출력 전압의 리플을 줄이거나 수동소자의 부피 저감을 위해서는 높은 스위칭 주파수가 필요로 하고 이것은 스위칭 손실로 이어진다. GaN HEMT는 기존에 사용된 Silicon(Si) MOSFET 대비 Wide bandgap(WBG) 특성을 가지는 소자로 낮은 온저항과 빠른 전자 이동도로 인해 스위칭 손실을 최소화할 수 있으며 낮은 스위칭 손실은 고속 스위칭을 가능하게 하여 높은 전력밀도와 고효율 설계에 용이하다.^[1]

본 논문은 GaN HEMT를 적용한 3kW급 동기식 Buck 컨버터 시작품을 개발하였고 이론 효율을 수식적으로 분석하여 예측한 효율과 실제 실험을 통해 측정된 효율을 비교하였다.

2. Buck Converter 설계 및 분석

2.1 회로 설계

그림 1은 동기식 Buck 컨버터 회로이다. Buck 컨버터는 하단 스위치 Q₂의 소자에 따라 동기식과 비동기식으로 분류된다. 동기식 Buck 컨버터는 비동기식 컨버터의 다이오드에서의 도통 손실보다 도통 손실 및 스위칭 손실이 낮아 효율이 높다는 장점이 있다. 스위치 Q₁ 및 Q₂는 GaN HEMT를 적용하였으며 두 스위치는 PWM 제어를 통해 상보 동작한다. 이때 스위치 Q₂는 다이오드의 역할을 대체하게 된다.

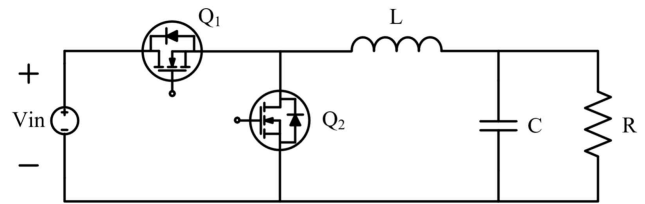


그림 1 동기식 Buck 컨버터 회로

Fig. 1 Circuit of synchronous buck converter

표 1 동기식 Buck 컨버터의 설계 파라미터

Table 1 Design parameters of synchronous buck converter

Parameter	Value	Unit
Input voltage, V_{in}	400	V
Output voltage, V_{out}	200	V
Rated output power, P_o	3000	W
Switching frequency, f_{sw}	100	kHz
Inductance, L	166.7	μ H
Capacitance, C	600	μ F

인덕터는 인덕터 전류 리플률 ($\Delta I_L/I_L$) 40%를 기준으로 166.7 μ H로 설계하였으며 커패시터는 100 μ F 크기의 커패시터를 6병렬로 구성하였고 스위칭 주파수 f_{sw} 는 100kHz로 선정하였다. 코어는 창성의 CM571060으로 선정하였으며 도선 재질은 copper, 전류 밀도는 4A/mm², 투자율은 60 μ H/m이다.

2.2 효율 분석

GaN HEMT를 적용한 Buck 컨버터의 스위치 손실은 크게 스위치, 인덕터 및 커패시터 손실로 이루어져 있다. 스위치 손실은 도통 손실 P_{cond} , 스위칭 손실 $P_{sw,on}$, $P_{sw,off}$ 기생 커패시턴스 손실 P_{coss} , 게이트 축적 전하 손실 P_{Qg} 가 있다. 스위치의 도통 손실 P_{cond} 는 아래 식과 같이 정의된다.

$$P_{cond} = R_{ds,on} \times I_{sw,rms}^2 \quad (1)$$

여기서 $R_{ds,on}$ 은 스위치가 도통 상태일 때 발생하는 저항을 의미하고 $I_{sw,rms}$ 는 스위치에 흐르는 전류의 실효값을 의미한다.

스위치 Turn-on/off 손실 $P_{sw,on}$, $P_{sw,off}$ 는 스위치 변화에 따른 손실이며 식은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{sw,on} = E_{on} \times \frac{I_{L,min}}{I_d} \times f_{sw} \quad (2)$$

$$P_{sw,off} = E_{off} \times \frac{I_{L,max}}{I_d} \times f_{sw} \quad (3)$$

위 식에서 E_{on} , E_{off} 는 스위치가 Turn-on/off 될 때의 에너지 손실을 의미하고 $I_{L,min}$, $I_{L,max}$ 는 인덕터 전류의 최소, 최대값을 나타내며 I_d 는 스위치 Datasheet 상 Drain-Source 전류 조건을 의미한다.

기생 커패시턴스의 손실 P_{coss} 은 다음과 같다.

$$P_{coss} = E_{oss} \times f_{sw} \quad (4)$$

여기서 E_{oss} 는 출력 커패시턴스 저장 에너지를 의미한다.

게이트 충전 전하 손실 P_{Qg} 은 아래 식과 같이 정의된다.

$$P_{Qg} = \frac{1}{2} \times V_{gs} \times Q_g \times f_{sw} \quad (5)$$

여기서 V_{gs} 는 Gate-Source 전압을 의미하고 Q_g 는 게이트 총 전하량을 의미한다.

인덕터의 손실은 인덕터 코어 손실 $P_{L,core}$ 및 인덕터와 커패시터의 도통 손실 $P_{L,cond}$, $P_{C,cond}$ 로 이루어져 있다. 인덕터 코어 손실 $P_{L,core}$ 는 코어의 Datasheet를 참조하면 다음과 같이 정의된다.

$$P_{L,core} = 0.29 \times (\Delta B)^{1.63} \times A \times l \quad (6)$$

위 식에서 ΔB 는 코어의 자속밀도를 의미하고 A 는 코어의 단면적, l 은 코어의 자기 경로 길이를 의미한다.

인덕터와 커패시터의 도통 손실 $P_{L,cond}$, $P_{C,cond}$ 는 다음과 같다.

$$P_{L,cond} = R_L \times I_{L,rms}^2 \quad (7)$$

$$P_{C,cond} = R_C \times I_{C,rms}^2 \quad (8)$$

여기서 R_L 과 R_C 는 인덕터와 커패시터의 기생저항 성분을 의미하고 $I_{L,rms}$ 와 $I_{C,rms}$ 는 인덕터와 커패시터에 흐르는 전류 rms를 의미한다.

GaN HEMT를 적용한 동기식 Buck 컨버터의 손실 분석은 최대 부하 상태를 기준으로 계산하였으며 Datasheet 및 식 (1)~식(8)을 통해 계산된 값을 표 2에 정리하였다.

표 2 Buck 컨버터의 손실 분석 결과

Table 2 Loss analysis results for synchronous buck converter

Parameter	Value	Unit
Conduction loss, P_{cond}	11.34	W
Switching ON loss, $P_{sw,on}$	8.04	
Switching OFF loss, $P_{sw,off}$	1.53	
Output parasitic capacitance loss, P_{coss}	3.4	
Gate charge loss, P_{Qg}	0.00228	
Inductor core loss, $P_{L,core}$	2.29	
Inductor conduction loss, $P_{L,cond}$	4.96	
Capacitor conduction loss, $P_{C,cond}$	0.67	

3. 하드웨어 실험 결과

그림 2는 제작된 3kW급 동기식 Buck 컨버터 시작품이다. 그림 3(a)는 최대 부하에서의 파형이며 인덕터 전류의 리플 Peak-Peak인 6A, 평균 출력 전압 200V 및 스위칭 주파수 f_{sw} 100kHz가 잘 관찰됨을 알 수 있다. 그림 3(b)는 부하별 예측 효율 및 측정 효율 그래프이다. 손실 분석을 통해 예측한 효율이 실제 측정 효율 결과와 유사하게 추종하고 있을 확인할 수 있다.

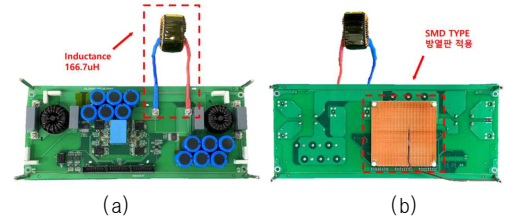
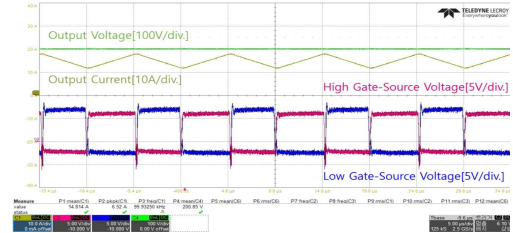
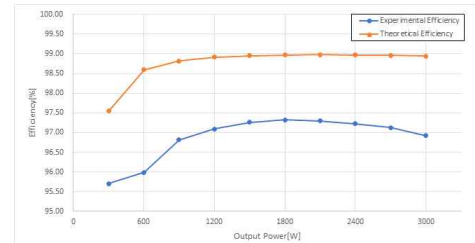


그림 2 3kW급 동기식 Buck 컨버터 시작품 (a)윗면 (b)아랫면
Fig. 2 Prototype of 3kW Buck Converter (a)Top view (b)Bottom view



(a)



(b)

그림 3 하드웨어 실험 결과 (a)결과 파형 (b)효율 그래프

Fig. 3 Experimental results (a)Test waveform (b)Efficiency graph

4. 결 론

본 논문에서는 GaN HEMT를 적용한 3kW급 동기식 Buck 컨버터를 개발하였다. 하드웨어 실험 결과 입출력 전압 및 전류제어가 정상적으로 동작함을 확인하였다. 스위치의 특성을 고려하여 수식적으로 손실을 분석하여 예측한 효율과 실제 측정 효율을 비교하였고 유사하게 추종함을 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20212020800020)

참 고 문 헌

- [1] 김준형, 그리고 권용성. "저전력 시스템에서 GaN HEMT와 Si MOSFET의 전력 손실 분석." 한국산학기술학회 논문지 23.9 (2022): 8-15.