

저전력 시스템에서 GaN HEMT와 Si MOSFET의 전력 손실 분석

김준형, 권용성*
한동대학교 기계제어공학부

Power Loss Analysis of GaN HEMT and Si MOSFET in Low-Power System

Junhyung Kim, Youngsung Kwon*
Department of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

요약 전력변환시스템의 효율 개선에 관한 관심은 기존의 전력전자 시장의 대부분을 차지했던 실리콘(Si: silicon) 전력 반도체의 물리적 한계로 인해 차세대 전력반도체라 불리는 질화갈륨 고속 전자 이동 트랜지스터(GaN HEMT: Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor)에 관한 연구로 확대되고 있다. 하지만 GaN HEMT를 적용한 연구는 kW 급의 전력 시스템에 초점이 맞춰졌으며 소형 전자기기 적용을 위한 저전력 시스템에서의 이론적 분석은 부족한 실정이다. 이론적 분석 없이 실험 결과에만 의존하는 기존 저전력 시스템의 효율 개선 연구는 다양한 시스템 환경에 적용하기엔 한계가 존재한다. 따라서, 본 논문에서는 원통형 리튬이온배터리를 충전할 수 있는 벽컨버터 토폴로지를 선정하여 저전력 시스템에서 Si MOSFET과 GaN HEMT의 효율 비교를 위한 단계적 손실 분석방법을 제안한다. 저전력 시스템의 손실 요인을 전기적 특성값으로 모델링했고 손실에 영향을 미치는 파라미터값은 측정값을 사용했다. 계산된 손실값을 통해 각 전력반도체 소자에 따른 경향성을 분석했고, 이를 검증하기 위해 벽컨버터를 설계하여 주파수에 따른 효율을 측정했다. 측정결과, 450 kHz 스위칭 구동에서 Si MOSFET 대신 GaN HEMT를 적용했을 때 13 %의 효율이 개선됐다. 단계적 이론 분석과 실험 결과를 통해 저전력 고주파 시스템에서 Si MOSFET보다 GaN HEMT가 더 적합함을 보였고 초고전력밀도, 초고효율의 GaN HEMT 어플리케이션 설계를 위해서는 스위칭 손실의 저감이 필수임을 보였다. 본 논문에서 제안한 저전력 시스템에서의 이론적 손실 분석법은 손실량을 정량적으로 평가할 수 있어 GaN HEMT를 적용한 저전력 시스템 설계 시 효율 분석 및 개선에 기여할 것으로 기대된다.

Abstract Silicon-based power semiconductors have occupied most of the power electronics market, but due to their physical limitations, Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors (GaN HEMT) are drawing attention. However, since studies applying GaN HEMT have focused on high-power systems, theoretical analysis of low-power systems is lacking. Research that depends only on experimental results has limitations in application to various low-power systems. Therefore, this paper proposes a step-by-step power loss analysis for comparing the efficiency of a Si MOSFET and a GaN HEMT in a low-power system by using a buck converter topology that can charge cylindrical lithium-ion batteries. The causes of loss were expressed as equations, and the parameter values affecting them were measured. The loss tendency was analyzed, and a buck converter was designed to measure the efficiency for verification. The result shows the efficiency was improved 13% when a GaN HEMT was applied in 450 kHz operation. It is shown that GaN HEMT are more suitable than a Si MOSFET in low-power, high-frequency systems and that it is necessary to reduce switching losses for designing high-efficiency GaN HEMT applications. The power loss analysis can quantitatively evaluate the amount of loss and is expected to contribute to efficiency improvement when designing low-power systems.

Keywords : GaN HEMT, Si MOSFET, DC-DC Converter, Power Electronics, Li-ion Battery

이 논문은 한국수력원자력(주)의 지원으로 수행된 연구임. (2022)

*Corresponding Author : Youngsung Kwon(Handong Global Univ.)

email: youngsung.kwon@handong.edu

Received June 20, 2022

Revised August 1, 2022

Accepted September 2, 2022

Published September 30, 2022

1. 서론

최근 기후변화에 대한 국제 사회의 관심은 탄소 중립(net zero)이라는 새로운 에너지 패러다임을 불러일으켰다. 이러한 기조는 모빌리티 산업부문의 에너지 효율 개선을 요구하고 있으며, 특히 미래 모빌리티 사업의 먹거리인 전장사업 중 전력반도체 소자의 고효율화 연구로 이어지고 있다.

차세대 전력반도체의 동작 특성은 작은 역 회복 특성, 낮은 온저항($R_{ds(ON)}$), 그리고 고주파 스위칭이 가능해야 한다. 하지만 기존 실리콘(Si: silicon, 이하 Si) 기반의 전력반도체 소자는 높은 전압, 온도, 그리고 주파수 등의 환경에서 물리적 한계에 봉착했다[1]. 이를 극복하기 위해 새로운 소재를 이용한 와이드밴드갭(WBG: Wide Band Gap, 이하 WBG) 전력반도체에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[2]. WBG 전력반도체의 높은 밴드갭은 높은 전압에서의 동작, 더 높은 임계 항복 전압, 그리고 낮은 누설 전류를 가능하게 한다. 특히 대표적인 WBG 전력반도체 소재 중 하나인 질화갈륨(GaN: Gallium Nitride 이하 GaN)은 고속 전자 이동 트랜지스터(HEMT: High Electron Mobility Transistor 이하 HEMT) 구조를 가지며 이는 이종접합구조(heterostructure)로부터 발생하는 이차원전자가스(2DEG: 2-Dimensional Electron Gas 이하 2DEG) 채널의 빠른 전자 이동도와 포화 속도를 바탕으로 고주파 스위칭 동작을 가능하게 하여 차세대 전력반도체로 주목을 받고 있다[3].

이러한 특성을 바탕으로 GaN HEMT는 Si 기반의 전력반도체 소자인 금속 산화막 반도체 전계효과 트랜지스터(MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, 이하 MOSFET), 절연 게이트 양극성 트랜지스터(IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor, 이하 IGBT)를 대체하여 전력변환시스템에 적용되고 있는 추세이다. MOSFET과 IGBT 대신 GaN HEMT를 전력변환장치에 사용할 경우 낮은 도통 및 스위칭 손실로 약 1 MHz 내외의 고주파 동작이 가능하다[4]. DC-DC 컨버터와 같은 전력변환장치에서의 빠른 주파수 동작은 장치 내 가장 큰 부피를 차지하는 수동소자의 크기를 줄일 수 있으므로 전력밀도의 향상을 기대할 수 있다.

실제 3 kW급 태양광 인버터에 사용되는 Si IGBT를 대신하여 GaN HEMT를 적용한 연구가 진행됐으며 3.2 kW급 유도가열 시스템에서도 GaN HEMT 적용을 검증하는 연구가 진행됐다[5,6]. 이와 더불어 저전력 시스템에서도 GaN HEMT의 연구가 활발히 진행되고 있으며

이는 어댑터, 충전기와 같은 소형 전자기기에서의 에너지 효율을 개선했다[7]. 이처럼 GaN HEMT를 적용한 연구가 저전력 시스템으로까지 확대되고 있으나 단순히 실험 결과만으로 보이는 기존의 GaN HEMT 적용 효율 개선은 단계적 이론적 분석 기반 없이는 다른 저전력 어플리케이션에 적용하기에는 어려운 점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 GaN HEMT와 Si MOSFET를 적용한 저전력 시스템에서의 전력 손실을 이론적 분석을 통해 손실 경향성을 파악하고 효율 개선 방안을 모색한다. 두 전력반도체 소자가 모두 적용될 수 있는 PWM(Pulse Width Modulation) 컨트롤러 및 벽컨버터 토폴로지를 선정하였고 4.2 V의 출력전압으로 원통형 리튬이온배터리의 충전이 가능하도록 회로를 구성하였다. 또한, 벽컨버터의 효율 분석을 위한 도통 손실, 스위칭 손실, 게이트 충전 손실 및 출력 커패시턴스 손실 계산 방법을 제안하고 GaN HEMT를 Si MOSFET 대신 적용했을 때 어느 정도의 손실 저감 효과를 나타내는지 정량적으로 분석했다. 이를 검증하기 위해 12 V 입력, 4.2 V 출력의 벽컨버터를 설계하고 실험을 통해 스위칭 주파수에 따른 전력 손실의 경향성을 검증했다. 저전력 시스템 고주파 스위칭 동작에서 Si MOSFET 대신 GaN HEMT를 적용했을 때 약 13 % 효율 개선을 보였고 이는 GaN HEMT가 고효율, 고전력밀도 전력반도체로서 대전력뿐만 아니라 저전력 전자기기에서도 고성능의 전력반도체 스위치로써 적합함을 나타냈다.

2. 본론

2.1 스위칭 동작에 따른 GaN HEMT 분류

GaN HEMT의 구조는 이종접합구조로 알루미늄 질화갈륨(Aluminum Gallium Nitride)과 GaN의 계면 사이에 2DEG가 발생하여 상시도통하게 된다. 상시도통형 소자는 음의 문턱 전압을 가진다. 하지만 음의 문턱 전압을 갖는 전력반도체 소자는 음의 전압을 구동하기 위한 다소 복잡한 구조의 게이트 드라이버를 사용해야 한다는 단점이 있으며, 게이트 구동 실패 시 전력반도체 소자가 항상 턴 온(turn on) 상태로 유지되므로 안전성 문제에서 단점을 나타낸다. 이러한 이유로 GaN HEMT는 여러 가지 기술을 통해 상시불통형으로 개선되어 제시되고 있다[8].

상시불통형 GaN HEMT의 구조로는 강화모드(E-Mode: Enhancement Mode, 이하 E-Mode) GaN HEMT와

Cascode 구조형 GaN HEMT가 있다. E-Mode GaN HEMT는 리세스 게이트 공정, P-GaN 증착 등의 기술을 통해 상시불통 상태로 동작하게 된다[9,10].

또 다른 상시불통형 GaN HEMT로는 Cascode 구조형 GaN HEMT가 있다. 이는 저전압 Si MOSFET의 소스(source)와 드레인(drain)이 각각 고전압 공핍모드 GaN HEMT(D-Mode: Depletion Mode, 이하 D-Mode)의 게이트(gate)와 소스에 연결된 구조이다. Cascode 구조형 GaN HEMT는 GaN HEMT의 낮은 온저항, 고주파 동작 등 우수한 전기적 특성을 가지면서 Si MOSFET과 같이 안정적인 양의 문턱 전압을 갖는다.

2.2 전력 손실의 단계적 이론 분석법

다양한 저전력 시스템에서 GaN HEMT 적용의 적합성을 검증하기 위해서는 단계적인 전력 손실 이론 분석법이 필요하다. 본 논문에서는 GaN HEMT와 Si MOSFET을 저전력 시스템에 각각 적용하여 각 전력반도체 소자에 따른 손실 경향성을 분석하고 그에 따른 효율 개선안을 모색할 수 있는 단계적 전력 손실 분석법을 제안한다. Fig. 1에서는 본 논문에서 제안한 저전력 시스템의 단계적 손실 분석법을 순서도로 나타냈다. 순서도는 전력반도체 소자 비교를 위한 토폴로지 선정, 손실 요인 및 손실 파라미터값 측정, 계산된 이론손실에 따른 경향성 파악, 실험을 통한 검증, 그리고 이론 분석과 실험 결과를 통한 효율 개선안 모색으로 이뤄진다.

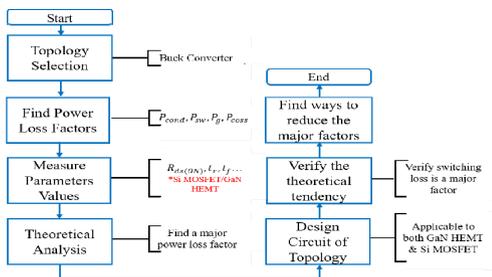


Fig. 1. Flowchart for phased loss analysis

2.3 전력반도체 소자에 따른 효율 비교를 위한 벽컨버터 모델링

2.3.1 전력반도체 소자 선정

현재 상용화된 상시불통형 GaN HEMT는 앞서 2.1장에서 언급된 바와 같이 E-Mode GaN HEMT와 Cascode 구조형 GaN HEMT 두 가지로 나뉜다. E-Mode GaN HEMT는 Si MOSFET에 비해 낮은 문턱 전압값을 가지

므로 E-Mode GaN HEMT 전용 게이트 드라이버를 사용한다. 반면, Cascode 구조형 GaN HEMT는 Si MOSFET과 같은 게이트 드라이버를 적용할 수 있다. 이에 따라 Si MOSFET과 같은 회로에서 동작할 수 있는 Cascode 구조형 GaN HEMT를 선정했다. Cascode 구조형 GaN HEMT는 Transphorm사의 TP65H035WS를 사용했고 Si MOSFET은 이와 비슷한 내압을 가지는 Vishay사의 SIHA21N60EF를 사용했다.

2.3.2 전력 손실 분석을 위한 토폴로지 선정

전력변환장치 중 하나인 벽컨버터를 모델링 하여 이론과 실험을 통해 Si MOSFET과 GaN HEMT의 효율을 비교한다. 입력 전압의 변동에도 안정적인 출력전압을 갖기 위해 Fig. 2와 같이 전압제어 기반의 벽컨버터를 선정했다. 실제 실험에 사용된 벽컨버터는 Texas Instruments사의 UC3845 컨트롤러를 사용하였고 12 V 입력, 4.2 V 출력에서 동작한다.

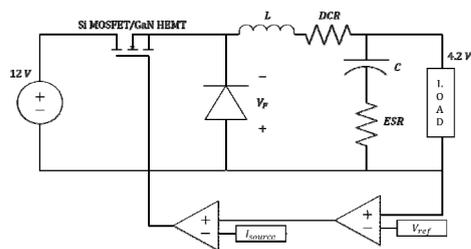


Fig. 2. Designed circuit diagram

2.3.3 인덕턴스 선정

설계된 벽컨버터는 CCM(Continuous Current Mode)에서 동작하므로 스위칭 주파수에 따른 적절한 인덕턴스 값이 요구된다. 인덕턴스의 크기는 스위칭 주파수가 클수록 작아지는데 이는 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다. 벽컨버터 회로는 12 V 입력, 4.2 V 출력에서 동작하므로 그에 따른 시비율(duty ratio)을 고려해야 한다. 또한, 원통형 리튬 이온 배터리 충전을 위한 부하의 최대 저항값은 20 ohm이라고 가정한다. 주파수에 따른 Si MOSFET과 GaN HEMT의 손실 차이를 확인하기 위해 Si MOSFET에서 주로 구동되는 스위칭 주파수인 100 kHz와 UC3845의 최대 스위칭 주파수에 가까운 450 kHz에서 벽컨버터를 동작시키도록 한다. 그리고 인덕터 전류의 스파이크 및 노이즈에 내성을 갖기 위해 인덕턴스 값 설계에 약 40 %의 여유를 주었다. 이에 따라 100 kHz 스위칭 시 100 μH, 450 kHz 스위칭 시 22 μH의

크기를 가진 인덕터를 사용했다.

$$L \geq \frac{(1-D)R}{2f_{sw}} \quad (1)$$

Where, L denotes inductance, D denotes duty ratio, R denotes load resistance, and f_{sw} denotes switching frequency

2.4 손실 분석

벽컨버터의 효율을 분석하기 위해서는 컨버터 동작 시 발생하는 손실 부분의 계산이 필요하다. 벽컨버터의 손실 요인들은 Eq. (2)에서 나타나는 바와 같으며 각각의 손실을 전기적 특성값으로 모델링 하여 이론적 접근을 시도한다. P_{cond} 은 도통 손실, P_{sw} 는 스위칭 손실, P_g 는 게이트 충전 손실, 그리고 P_{coss} 는 출력 커패시턴스 손실을 나타낸다.

$$P_{loss} = P_{cond} + P_{sw} + P_g + P_{coss} \quad (2)$$

Where, P_{loss} denotes total loss, P_{cond} denotes conduction loss, P_g denotes gate charge loss, and P_{coss} denotes output capacitance loss

2.4.1 도통 손실

도통 손실은 소자에 전류가 흐를 때 소자의 저항 성분으로 인해 발생하는 손실이다. 도통 시, 트랜지스터의 경우 온저항에 의해, 수동소자인 인덕터와 커패시터는 각각 직류 저항(DCR: Direct Current Resistance, 이하 DCR), 등가 직렬 저항(ESR: Equivalent Series Resistance, 이하 ESR)에 의해 손실이 발생한다. 다이오드의 경우 순방향 전압(V_F)에 의해 전압 강하가 발생한다. Si MOSFET/GaN HEMT의 도통 손실은 Eq. (3), 다이오드 도통 손실은 Eq. (4), 인덕터 및 커패시터의 도통 손실은 각각 Eq. (5), Eq. (6)로 계산할 수 있다.

$$P_{MOS/HEMT} = [I_{out}^2 + \frac{(\Delta I_L^2)}{12}] \times R_{ds(ON)} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3)$$

$$P_{Diode} = I_{out} \times V_F \times (1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}) \quad (4)$$

$$P_{DCR} = [I_{out}^2 + \frac{(\Delta I_L^2)}{12}] \times DCR \quad (5)$$

$$P_{ESR} = \frac{(\Delta I_L^2)}{12} \times ESR \quad (6)$$

Where, I_L denotes inductor current, I_{out} denotes output current, $R_{ds(ON)}$ denotes On-resistance, V_{in} denotes input voltage, V_{out} denotes output voltage, V_F denotes forward direction voltage of diode, DCR denotes direct current resistance of inductor, and ESR denotes equivalent series resistance of capacitor

2.4.2 스위칭 손실

전력반도체 소자인 Si MOSFET/GaN HEMT는 스위칭 동작 시 손실을 유발하는데 이는 스위칭 주파수 제한의 주요 원인으로 전자기기의 소형화 및 고효율화를 위해서는 낮은 스위칭 손실이 필요하다. Fig. 3은 스위치 턴 온 시 전압과 전류의 파형을 나타낸 그래프이다. 게이트-소스 전압(V_{gs})에 충분한 전압이 인가되어 스위치가 턴 온 되었을 때, 드레인-소스 전압(V_{ds})이 감소하기 시작한다. 이때, 전압과 전류(I_d)가 모두 0이 되지 않는 과도 구간에서 스위칭 손실이 발생한다. 주파수, 상승시간(t_r), 하강시간(t_f)을 고려한 전력반도체 소자의 스위칭 손실은 Eq. (7)로 계산할 수 있다.

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \times V_{in} \times I_{out} \times (t_r + t_f) \times f_{sw} \quad (7)$$

Where, t_r denotes rising time of gate-source voltage, and t_f denotes falling time of gate-source voltage

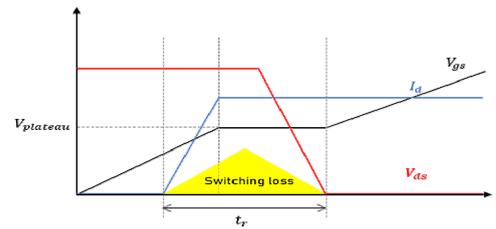


Fig. 3. Switching losses in Si MOSFET/GaN HEMT

Fig. 4는 12 V 입력, 4.2 V 출력, 100 kHz에서의 Si MOSFET과 GaN HEMT의 게이트-소스 전압을 측정된 그래프이다. GaN HEMT는 Si MOSFET보다 더 큰 진동을 보이지만 상승시간과 하강시간이 더 짧으므로 더 적은 스위칭 손실을 기대할 수 있다.

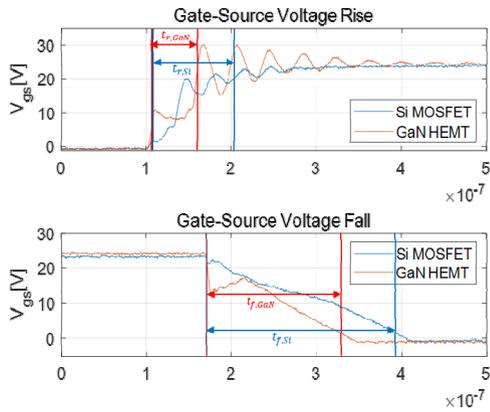


Fig. 4. Gate-Source voltage of Si MOSFET and GaN HEMT

2.4.3 게이트 충전 손실

전력반도체 소자를 구동시키기 위해 게이트에 충분한 전하량을 주입해야 한다. 이때 필요한 전하량을 게이트 총 전하량(Q_g)라 하며 이는 전력반도체 소자의 기생 커패시턴스에 의해 발생한다. 필요한 용량까지 충전하는데 시간이 소요되므로 이는 손실로 표현된다. 게이트 충전에 의한 손실은 Eq. (8)로 계산할 수 있다.

$$P_g = Q_g \times V_{gs} \times f_{sw} \quad (8)$$

Where, Q_g denotes total gate charge, and V_{gs} denotes gate-source voltage

2.4.4 출력 커패시턴스 손실

Si MOSFET과 GaN HEMT는 구조상 Fig. 5와 같이 기생 커패시턴스가 존재한다. C_{gs} 는 게이트와 드레인 사이 커패시턴스, C_{gd} 는 게이트 산화막의 커패시턴스이다. C_{ds} 는 기생 다이오드의 접합 커패시턴스로 위 세 가지 값은 데이터시트에 표기된다. 그 중 C_{ds} 와 C_{gd} 를 합산한 커패시턴스를 출력 커패시턴스(C_{oss})라 하는데 출력 커패시턴스가 클수록 드레인-소스 전압의 턴 온, 턴 오프가 지연된다. 따라서 이는 손실로 표현되고 이는 Eq. (9)로 계산할 수 있다.

$$P_{oss} = \frac{1}{2} \times C_{oss} \times V_{in}^2 \times f_{sw} \quad (9)$$

Where, C_{oss} denotes output capacitance

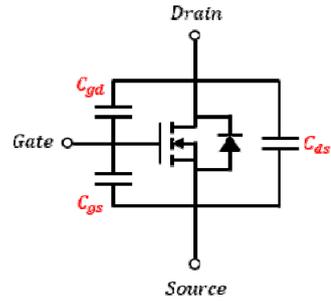


Fig. 5. Parasitic capacitance of MOSFET

2.4.5 손실 계산을 위한 손실 파라미터값 측정

본 논문에서는 Si MOSFET과 같은 구동 회로를 가질 수 있는 Cascode 구조형 GaN HEMT를 사용하여 두 전력반도체의 전력 손실과 효율을 이론적으로 분석하고 실험을 통해 검증한다. Table 1은 손실 계산에 필요한 전력반도체 소자의 파라미터 값들을 나타낸다. 온저항의 경우 12 V의 게이트-소스 전압(V_{gs})과 25 °C의 동작 온도 조건에서 측정된 값이다. 게이트-소스 전압의 상승시간(t_r)과 하강시간(t_f)은 오실로스코프를 통해 측정했으며 기생 커패시턴스의 경우 데이터시트를 참고했다. 파라미터들은 손실 계산식에 대입되어 벽컨버터의 손실을 정량적으로 나타냈다.

Table 1. Specifications of Si MOSFET and GaN HEMT

Parameters	Si MOSFET SIHA21N60EF	GaN HEMT TP65H035WS
Drain-Source Voltage	600 [V]	650 [V]
On-Resistance	131 [mohm]	29 [mohm]
Gate Charge	23.4 [nC]	18.6 [nC]
Output Capacitance	1500 [pF]	2500 [pF]
Rise Time	113.3 [ns]	55.2 [ns]
Fall Time	109.0 [ns]	52.8 [ns]

2.4.6 손실 이론 계산

전력반도체 소자에 따른 벽컨버터의 전력 손실을 손실 파라미터 측정, 각 손실 식에 따른 손실 계산, 그리고 스위칭 주파수에 따른 경향성 파악이라는 단계적 평가 과정을 통해 분석하도록 한다. Table 2는 12 V 입력과 4.2 V, 2 A 출력 조건에 대해 각 손실에 따른 이론적 손실 계산 값을 나타낸다. 계산된 각 손실을 분석하면 도통 손실의 경우 GaN HEMT는 낮은 온저항으로 낮은 손실

값을 보인다. 더욱이 고주파 동작으로 수동소자의 크기를 줄일 수 있어 수동소자에서 발생하는 손실 값이 적어짐을 확인할 수 있다. Fig. 6은 주파수가 높을수록 스위칭 손실이 지배적임을 나타낸다. GaN HEMT의 짧은 상승시간 및 하강시간으로 인해 고주파 동작에서 스위칭 손실은 Si MOSFET보다 훨씬 적게 발생한다. 이를 통해 GaN HEMT가 저전력 고주파 시스템에서 Si MOSFET보다 적합함을 알 수 있다.

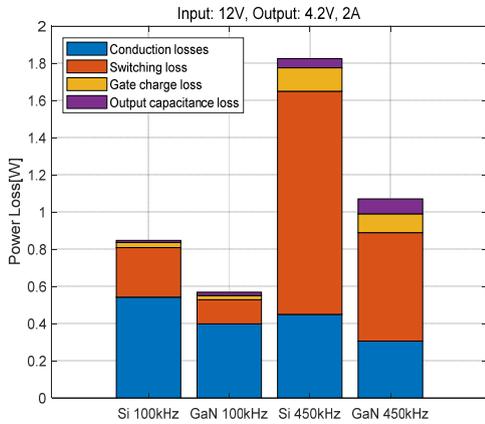


Fig. 6. Cumulative bar graph of losses in given conditions

Table 2는 Si MOSFET이 100 kHz Si MOSFET과 450 kHz GaN HEMT의 스위칭 구동 시 손실을 정량적으로 나타낸다. 도통 손실의 경우 스위칭 주파수의 영향을 받지 않아 낮은 온저항 특성을 가지며 작은 크기의 수동소자를 가진 GaN HEMT에서 낮은 손실 값을 보이지만 스위칭 손실의 경우 주파수가 높을수록 손실이 커지

Table 2. Losses in the buck converter

		Si MOSFET		GaN HEMT	
Frequency [kHz]		100	450	100	450
Conduction loss [mW]	MOSFET/HEMT	183.7	183.7	40.7	40.7
	Diode	221.0	221.0	221.0	221.0
	Inductor	136.2	44.1	136.2	44.1
	Capacitor	0.621	0.153	0.621	0.153
Switching loss [mW]		266.8	1200	129.6	583.2
Gate charge loss [mW]		28.1	126.4	22.3	100.4
Output capacitance loss [mW]		10.8	48.6	18.0	81.0
Total loss [mW]		847.2	1824	568.4	1070
Efficiency [%]		90.84	82.16	93.66	88.70

게 되어 GaN HEMT의 전체 손실 값이 100 kHz 구동의 Si MOSFET보다 더 커짐을 확인할 수 있다.

2.5 실험 결과 분석

2.5.1 실험 환경 구축

본 논문에서는 벡컨버터의 효율을 측정하기 위해 Table 3의 장치들을 사용하여 실험을 진행했다. 전류모드 PWM 컨트롤러를 사용하여 12 V의 입력에 대해 4.2 V의 전압이 출력되는 것을 전압계를 통해 확인했다. Fig. 7은 실험 장치 구성을 나타낸다. DC 파워서플라이를 통해 벡컨버터에 12 V의 입력을 제공하며 오실로스코프를 통해 출력전압의 크기와 게이트-소스 전압의 상승시간 및 하강시간을 측정했다. 그리고 디지털멀티미터를 사용하여 벡컨버터에 공급되는 입력 전류와 부하에 따른 부하전류를 측정했다.

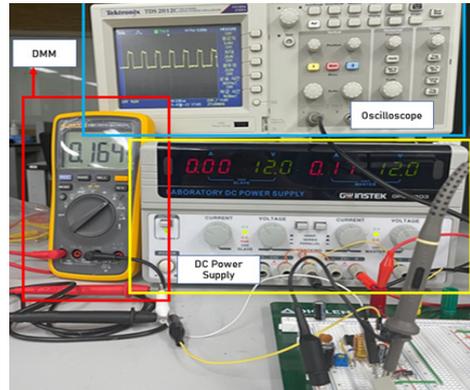


Fig. 7. The experimental equipment configuration

Table 3. Equipment lists used in experiment

Equipment	Company	Model Name
DC Power Supply	GW Instek	GPS3303
Digital Multimeter	Fluke	17B+
Oscilloscope	Tektronix	TDS2012C
LCR meter	Hioki	IM3533-01
PWM controller	Texas Instruments	UC3845BN

2.5.2 실험 결과

Eq. (10)를 사용하여 효율을 계산했다.

$$\eta[\%] = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{V_{out} \times I_{out}}{V_{in} \times I_{in}} \times 100 \quad (10)$$

Where, P_{in} denotes input power, and P_{out} denotes output power

벽컨버터는 100 kHz와 450 kHz 스위칭 주파수를 갖도록 구동되었으며 Eq. (1)에 따라 스위칭 주파수에 따른 인덕턴스 값을 선정했다. Fig. 8은 100 kHz와 450 kHz 스위칭 주파수에서 Si MOSFET과 GaN HEMT가 각각 적용된 벽컨버터의 효율을 측정된 결과이다. 100 kHz의 스위칭 주파수에서는 이론 분석 결과 도통 손실이 지배적이었다. GaN HEMT는 Si MOSFET보다 낮은 온저항 특성을 나타내지만 거의 비슷한 효율을 보였다. 이는 실험에 사용된 저전력 벽컨버터의 경우 20 W 이하의 낮은 전력을 공급하므로 도통 손실에 있어 Si MOSFET과 큰 차이를 보이지 못한 것으로 해석할 수 있다.

반면, 450 kHz의 스위칭 주파수의 경우 이론 손실 분석 결과 스위칭 손실이 지배적이었다. 실험 결과 GaN HEMT를 Si MOSFET 대신 사용하였을 경우 최대 약 13%의 효율 개선을 보였다. 이는 고주파 저전력 시스템에서 GaN HEMT의 사용이 Si MOSFET보다 적합하다는 것으로 해석할 수 있다.

하지만, 450 kHz 조건에서 GaN HEMT를 적용한 벽컨버터의 효율은 스위칭 손실로 인해 약 86.9%로 100 kHz에서의 효율보다 낮은 수치를 보였다. 물론 450 kHz 구동 시 인덕턴스의 크기를 100 μ H에서 22 μ H로 줄일 수 있지만, GaN HEMT를 적용한 저전력 시스템의 전력밀도와 효율을 높이기 위해서는 반드시 스위칭 손실의 저감이 필요하다는 것으로 해석할 수 있다.

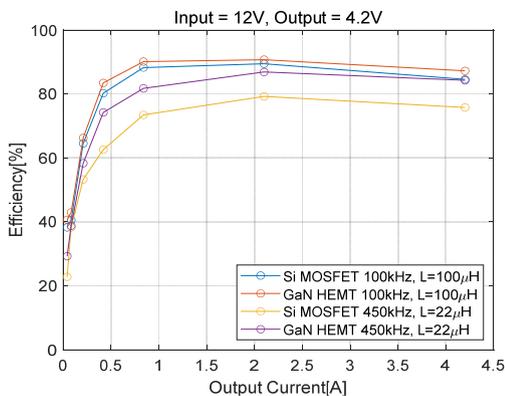


Fig. 8. Current-Efficiency curve of buck converter

3. 결론

본 논문에서는 저전력 시스템에서 Si MOSFET과 GaN HEMT의 적합성을 비교하기 위해 벽컨버터에서의

이론 손실 계산법을 제안했다. 손실 계산에 사용된 파라미터들은 측정값을 이용하거나 각 소자의 데이터시트를 참고하여 손실 식에 대입했다. 전력반도체 소자에 따른, 스위칭 주파수에 따른 손실 값은 이론 식을 통해 정량적으로 평가됐고 이를 통해 저전력 시스템, 고주파 스위칭 동작에서는 도통 손실보다 스위칭 손실이 더 주요한 효율 저감 요인임을 알 수 있었다. 실제 저전력 어플리케이션에서의 효율 분석을 위해 원통형 리튬이온배터리를 충전할 수 있는 4.2 V 출력의 벽컨버터를 설계했고 전력반도체 소자에 따른, 스위칭 주파수에 따른 효율을 측정했다. 실험 결과, 빠른 스위칭 특성을 가진 GaN HEMT가 스위칭 주파수가 클수록 Si MOSFET보다 더 높은 효율을 보였고 이론 분석과 경향성이 일치함을 확인했다. 특히, 450 kHz 동작에서 Si MOSFET 대신 GaN HEMT를 적용했을 때 최대 13%의 효율 개선을 통해 GaN HEMT가 저전력, 고주파 시스템에 더 적합함을 검증했다.

본 논문에서 제안한 단계적 손실 분석방법은 스위칭 주파수에 따른 저전력 시스템의 손실 값의 경향성을 파악하고 그에 따른 손실 저감 방법을 모색하는 데 유용하게 사용될 것이다. 이를 통해 본 논문은 실제 GaN HEMT 적용 어플리케이션 개발 시 고전력밀도 및 고효율 디자인을 설계하는데 기여할 것으로 기대된다.

References

- [1] F. Roccaforte, G. Greco, P. Fiorenza and F. Iucolano, "An overview of normally-off GaN-based high electron mobility transistors", *Materials*, Vol.12, No.10, pp.1599-1616, May 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma12101599>
- [2] B. Stevanovic, G. Salinas, P. Alou, J.A. Cobos and M. Vasic, "Comparative evaluation of the two multilevel concepts with full ZVS operation employing WBG devices for use in 1500-V PV systems", *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol.58, No.3, pp.3922-3935, May 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2022.3156123>
- [3] J. Millan, P. Godignon, X. Perpina, A. Perez-Tomas and J. Rebollo, "A survey of wide bandgap power semiconductor devices", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.29, No.5, pp.2155-2163, May 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2013.2268900>
- [4] D. Iero, R. Carotenuto, M. Merenda, F. Pezzimenti and F. G. D. Corte, "Performance evaluation of silicon and GaN switches for a small wireless power transfer system", *Energies*, Vol.15, No.9, pp.3029-3046, Apr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093029>

- [5] S. G. Han, Y.S. Noh, B. J. Hyon, J. S. Park, and D. Joo, "Development of a 3kW grid-tied PV inverter with GaN HEMT considering thermal considerations", *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol.26, No.5, pp.325-333, Oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2021.26.5.325>
- [6] M. J. Kwon, E. S. Jang, S. M. Park and B. K. Lee, "Design and hardware verification of power conversion system for GaN-HEMT based anyplace induction cooktop", *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol.25, No.6, pp.451-458, Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2020.25.6.451>
- [7] C. Yao, *et al.*, "Adaptive constant power control of MHz GaN-based AC/DC converters for low power applications", *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol.54, No.3, pp.2525-2533, May 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2018.2804319>
- [8] Ma, C.T. and Gu, Z.H., "Review of GaN HEMT applications in power converters over 500W", *Electronics*, Vol.8, No.12, pp.1401-1429, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8121401>
- [9] M. Zhu, J. Ma, L. Nela, C. Erine and E. Matioli, "High-voltage normally-off recessed tri-gate GaN power MOSFETs with low on-resistance", *IEEE Electron Device Letters*, Vol.40, No.8, pp.1289-1292, Aug. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2019.2922204>
- [10] G. Greco, F. Iucolano and F. Roccaforte, "Review of technology for normally-off HEMTs with p-GaN gate", *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol.78, pp.96-106, May 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/i.mssp.2017.09.027>

권 용 성(Youngsung Kwon)

[정회원]



- 2012년 8월 : University of Texas at Austin (공학석사)
- 2015년 8월 : University of Texas at Austin (공학박사)
- 2015년 10월 ~ 2018년 8월 : LG 전자 VC사업본부 선임연구원
- 2018년 9월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부 조교수

<관심분야>

전력변환, 전력계통 등

김 준 형(Junhyung Kim)

[준회원]



- 2016년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부

<관심분야>

전력변환, 전력반도체 등