

Induction Heating System에서 SiC MOSFET과 GaN Transistor의 Performance 비교를 통한 소자 적합성 분석

차광형, 김래영†
한양대학교

Device Suitability Analysis by Comparing Performance of SiC MOSFET and GaN Transistor in Induction Heating System

Kwang Hyung Cha, Rae Young Kim†
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 Induction Heating(IH) 시스템에서 WBG 소자인 SiC MOSFET과 GaN Transistor의 Performance 비교를 통해서 소자의 적합성을 분석한다. SiC 및 GaN 소자를 직렬 공진형 컨버터로 구성된 IH 시스템에 적용하여 온도, 전압, 전류, Gate 저항 등을 고려한 도통 손실, 스위칭 손실, 역방향 도통 손실과 열 해석 프로그램을 통한 열 성능 등의 비교가 수행되며, 이를 통해 소자 적합성이 분석된다. 각 소자에 따른 IH 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하여, 이론적 손실 비교를 통한 소자 적합성 분석에 대한 타당성을 검증한다.

1. 서론

최근 물리적 특성이 우수한 Wide Band Gap(WBG)소자에 대한 관심이 높아지고 있다. WBG소자는 높은 전압 정격에서 낮은 온 저항 및 스위칭 손실을 가지며, 고속스위칭이 가능하다. 고속 스위칭은 다양한 Application에서 시스템의 크기를 줄일 수 있기 때문에 전력밀도와 cost의 이점을 가진다. 이러한 이점으로 인해 WBG 소자를 다양한 토폴로지에 적용하여 성능을 비교 분석한 연구들이 진행되었다.

진행된 연구는 Si IGBT와 SiC MOSFET, JFET을 다양한 컨버터 토폴로지에 적용했을 때, 이론적인 효율 및 전력밀도 등이 비교 분석되었다^[1]. SiC소자는 Si소자에 비해 낮은 스위칭 손실 및 전도 손실을 통해서, 높은 효율 및 전력밀도가 달성됨으로서 각 토폴로지에 적합함이 증명되었다. 또한 WBG 소자인 SiC와 GaN을 동일한 토폴로지에 적용하여 비교 분석한 연구 결과도 제시되었다. SiC와 GaN을 On-board Charger(OBC)에 적용하여 Power loss, 열 성능, cost, 전력 밀도, 효율 등을 비교 분석하였으며, 연구결과는 SiC에 비해 물리적 특성이 더 우수한 GaN에서 높은 효율, 전력밀도 등이 검증되었다^[2]. 하지만 GaN은 온도에 따른 온 저항의 특성, 낮은 임계전압 및 좁은 범위의 Gate 전압, 작은 기생 커패시턴스 등에 의해서 실제 시스템 구성에서 토폴로지 및 조건에 따라서 GaN은 SiC보다 효율이 저하된다. 또한 GaN은 물질의 열전도율이 매우 낮아 방열 성능이 저하될 수 있다. 따라서 시스템에 따른 GaN 소자와 SiC소자의 온도에 따른 온 저항을 반영한 도통 손실, Gate 저항에 따른 스위칭 손실, 역방향 도통 손실, 열 성능 등의 비교 분석 및 검증이 필요하다.

한편 최근 IH 방식의 인덕션 레인지는 고효율 및 가열의 안

정성, 빠른 가열속도로 인해 기존의 가스레인을 대체할 차세대 가열장치로 주목 받고 있다. 최근 이러한 IH 시스템은 기존의 IGBT와 달리 스위칭 손실이 작은 WBG 소자의 발전으로, 주파수를 증가시킴으로서 더 높은 출력전력을 달성할 수 있다. 하지만 IH 시스템에 WBG소자인 GaN과 SiC를 적용하여 비교 분석한 연구가 존재하지 않기 때문에, 어떠한 소자가 IH 시스템에서 더 우수한 성능을 나타낼지 알 수 없다.

본 논문에서는 SiC 소자와 GaN 소자를 공진형 컨버터 토폴로지에 적용하여 IH 시스템에서의 SiC 및 GaN 소자의 적합성을 분석하고자 한다. 이를 위해 각 소자별 온도 변화를 고려한 소자별 도통 손실, Gate 저항 가변에 따른 소자 별 스위칭 손실, 전류에 따른 역방향 도통 손실을 분석한다. 이를 기반으로 손실 및 열 성능 등을 고려한 IH 시스템에서의 SiC 및 GaN 소자의 적합성을 제시한다. 각 소자에 따른 시뮬레이션 모델을 구축하고, 시뮬레이션을 통한 전력 손실을 추출하여 이론적 손실 해석을 통한 적합성 분석에 대한 타당성을 검증한다.

2. WBG 소자 손실 해석

본 장에서는 도통 손실, 스위칭 손실, 역방향 도통 손실의 이론적 비교 분석이 수행된다. 손실 분석을 위해 표 1과 같이 소자를 선정하였다.

표 1 선정된 소자의 사양
Table 1 Specification of selected devices

Parameter	SiC -MOSFET	GaN -Transistor
Part number	SCT3030AR	GS66516T
Breakdown Voltage	650V	650V
Continuous current	70A	60A

2.1절 온도에 따른 도통 손실

소자의 도통 손실은 출력 전류와 소자의 온 저항에 의해서 결정되므로 다음과 같이 유도된다.

$$P_{C(Q_{th})} = \frac{1}{T} \int_{t_{start}}^T R_{DS(on)} i_{out}^2 dt \tag{1}$$

본 논문에서는 datasheet의 실험 조건을 일반화하고, 그에 따른 변화량을 curve-fitting을 통해 반영하여 온도와 Gate 전압을 고려한 온 저항을 유도하였다. 식(2)은 SiC에 대한 온 저항이며, 식(3)은 GaN에 대한 온 저항을 나타낸다. 식(2)와 식(3)을 비교하면 온도에 따라 증가하는 온 저항의 변화율이 GaN이 매

우 크기 때문에 정격부하에서 GaN의 도통손실이 SiC보다 커짐을 예측할 수 있다.

$$R_{DS(on)} = 0.031 \begin{pmatrix} -0.001544 V_{GS}^3 + 0.1024 V_{GS}^2 \\ -2.22696 V_{GS} + 17.684 \\ (8 \times 10^{-6} t_j^2 - 0.0013 t_j + 0.969) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R_{DS(on)} = 0.025 \begin{pmatrix} -0.00778 V_{GS}^3 + 0.1516 V_{GS}^2 \\ -1.0181 V_{GS} + 3.3504 \\ (3.2 \times 10^{-7} t_j^3 - 4 \times 10^{-5} t_j^2 + 0.0128 t_j + 0.7) \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.2절 Gate 저항에 따른 스위칭 손실

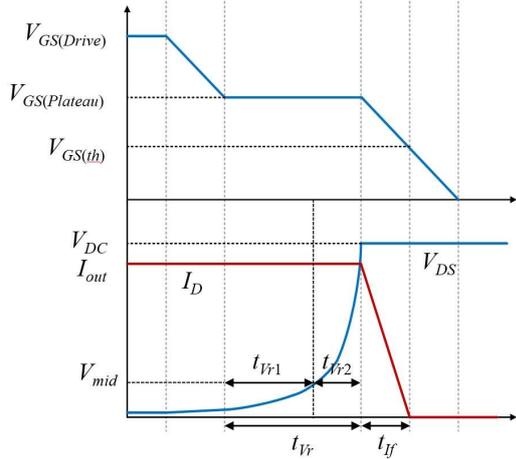


그림 4 스위치의 일반적인 턴 오프 시의 파형
Fig. 4 Waveform at Typical Turn-Off of Switch

IH 시스템의 스위칭 손실은 영전압 스위칭이 되기 때문에 주로 턴 오프 시의 스위칭 손실이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 Gate 저항 및 스위치에 인가되는 양단 전압을 고려한 turn off의 스위칭 손실의 수식을 유도하여 계산한다. 그림 4에서 스위칭 손실은 주로 t_{Vr} 과 t_{Iff} 에서 발생하기 때문에 스위칭 손실의 수식은 다음과 같다.

$$P_{sw} = E_{off} f_{sw} \quad (4)$$

$$E_{off} = \frac{1}{2} V_{DC} I_{off} (t_{Vr} + t_{Iff}) \quad (5)$$

$$I_{off} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{DC}}{n\pi Z_n} (1 - \cos(n\pi)) \sin\left(-\tan^{-1} \frac{X_n}{R_{eq}}\right) \quad (6)$$

식(5)에서 소자에 따라 t_{Vr} 과 t_{Iff} 값이 다르게 나타나기 때문에 세분화된 계산이 필요하다. t_{Vr} 은 miller 커패시턴스로 인해 비선형적인 구간으로, t_{Vr1} 과 t_{Vr2} 로 나눈다. 그림 5는 V_{DS} 에 따른 C_{GD} 의 커패시턴스를 나타내며 급격히 변하는 구간을 기준으로 하여 다음 수식과 같이 근사한다.

$$C_{GD1} = \frac{C_{GDmax} + C_{GDmid}}{2} \quad (7)$$

$$C_{GD2} = \frac{C_{GDmid} + C_{GDmin}}{2} \quad (8)$$

따라서 비선형성을 고려한 t_{Vr} 은 다음과 같다.

$$t_{Vr1} = \frac{V_{mid} C_{GD1}}{I_{Goff}} \quad (9)$$

$$t_{Vr2} = \frac{(V_{DC} - V_{mid}) C_{GD2}}{I_{Goff}} \quad (10)$$

$$I_{Goff} = \frac{V_{Plateau}}{R_G} \quad (11)$$

t_{Iff} 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$t_{Iff} = R_G C_{ISS} \ln\left(\frac{V_{Plateau}}{V_{th}}\right) \quad (12)$$

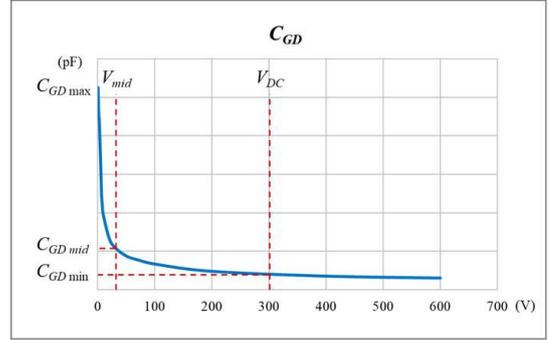


그림 5 V_{DS} 에 따른 C_{GD} 의 커패시턴스
Fig. 5 Capacitance of C_{GD} depending on V_{DS}

동일한 Gate 저항의 조건에서는 C_{GD} 가 매우 작은 GaN이 더 작은 스위칭 손실을 가질 것이며, PCB의 기생 인덕턴스 등에 의해서 턴 오프 시의 undershoot가 고려될 때, GaN의 Gate 저항이 커진다면, GaN보다 SiC의 손실이 더 작을 수 있다.

2.3절 역방향 도통 손실

역방향 도통 손실은 공진형 컨버터와 같이 역 전류를 통해 영전압 스위칭이 달성되는 토폴로지에서 매우 중요하다. Dead time 구간동안 발생하는 역방향 도통 손실은 다음과 같다.

$$P_{C(reverse)} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{dwt}} v_{SD} |i_{out}| dt \quad (13)$$

이때 소자별 v_{SD} 는 도통 손실과 동일한 방식으로 유도할 수 있다. 식(14)는 SiC, 식(15)는 GaN에 대한 v_{SD} 이다.

$$v_{SD} = 0.042 |i_{out}| + 2.14 \quad (14)$$

$$v_{SD} = 0.049 |i_{out}| + 1.74 + V_{gate\ off} \quad (15)$$

GaN은 임계전압으로 인해 턴 오프동안 음전압을 사용함에 따라 v_{SD} 의 값이 $V_{gate\ off}$ 가 더해져 큰 값을 나타내기 때문에 SiC가 더 적은 역방향 도통 손실이 발생함을 예측할 수 있다.

2.4절 이론적 손실 분석 결과

표 2 직렬 공진형 컨버터의 매개변수
Table 2 Parameters of series resonant converter

Parameter	Value
Input voltage	260V
Resonant inductance	10.65 μ H
Resonant capacitance	0.4 μ F
Load	2.07 Ω
Dead time	0.5 μ s

그림 6은 Half-bridge 구조의 IH 시스템에서 표 2와 같은 회로 조건에서 2.5kW에서의 계산을 통한 Loss breakdown을 나타낸다. 온도에 따른 온 저항의 증가로 도통손실은 GaN에서 더 크며, 스위칭 손실은 반대로 SiC가 매우 크다. 또한 GaN은 음전압으로 인해 역방향 도통 손실이 크게 발생함을 알 수 있다.

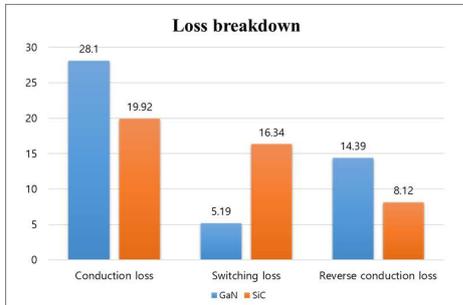


그림 6 2.5kW에서의 Loss breakdown
Fig. 6 Loss breakdown at 2.5 kW

그림 7은 출력 전력에 따른 이론적인 효율을 나타낸다. 대체적으로 스위칭 손실이 작은 GaN의 효율이 더 높게 나타난다. 하지만 정격 부하에서의 효율은 SiC가 더 높다. 이는 스위칭 손실은 GaN이 적게 나타나지만 도통 손실 및 역방향 도통 손실은 SiC가 적게 나타나며, Power가 증가할수록 도통 손실과 역방향 도통 손실의 영향이 커지기 때문에 GaN과 SiC의 효율 격차가 줄어든다.

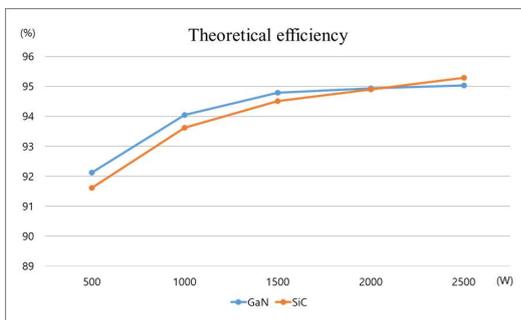


그림 7 출력 전력에 따른 이론 효율
Fig. 7 Theoretical efficiency according to output power

3. 시뮬레이션 결과

3.1절 열 성능 비교

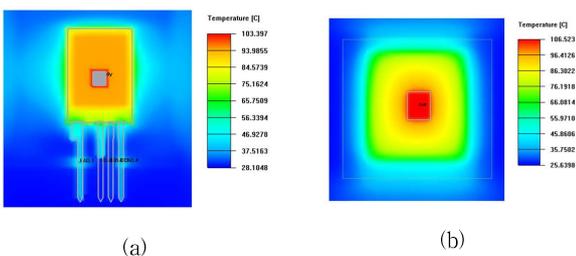


그림 8 30W 전력 손실에서의 온도 분석 결과
Fig. 8 Result of temperature analysis at 30W power loss

Datasheet 상의 접합부에서 케이스의 열 저항은 GaN이 SiC보다 더 작다. 하지만 GaN 물질의 열 전도성이 SiC의 1/3 수준으로 매우 작으므로, 열 해석 프로그램을 통한 비교 분석이 필요하다. 본 시뮬레이션은 동일한 방열판과 fan을 사용하여 소자에 30W의 손실이 발생했을 때의 결과를 나타낸다. 그림 8에서 SiC의 접합온도는 GaN보다 더 낮음을 알 수 있다. 이는 GaN의 열 저항이 낮음에도 불구하고, 패키징에 따라 방열판에 닿는 면적이 적으며, 열 전도성이 SiC에 비해 떨어지기 때문에 나타나는 결과로 볼 수 있다

3.2절 효율

출력 전력에 따른 이론 효율을 검증하기 위해서 각 소자에 따른 시뮬레이션을 진행하였으며, 그림 9와 같다. 그림 9에서 출력 전력에 따른 시뮬레이션 효율로서 이론 효율과 거의 동일한 함을 알 수 있다.

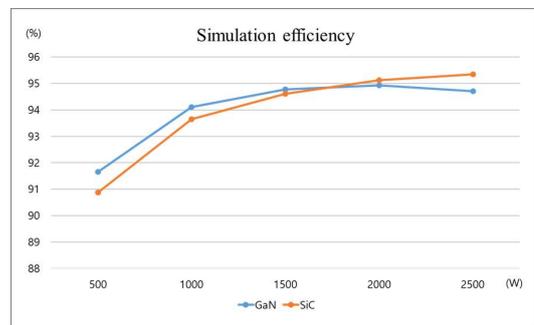


그림 9 출력 전력에 따른 시뮬레이션 효율
Fig. 9 Simulation efficiency according to output power

4. 결론

본 논문은 IH 시스템에 GaN과 SiC를 적용했을 때, 손실과 열 성능에 대한 비교를 통해서 소자 적합성을 분석하였다. 온도 및 Gate 저항 등을 고려한 이론적 손실 분석을 통해 2kW 이하의 전력에서는 스위칭 손실이 적은 GaN이 더 우수하게 나타났으나, 2kW 이상에서는 도통 손실과, 역방향 도통 손실이 적은 SiC가 더 우수한 특성을 나타냈다. 열 성능에서는 열 전도성과 패키징에 의해서 SiC가 더 우수한 성능이 나타났다. 결과적으로 높은 출력 전력에서는 높은 효율과 방열이 더 우수한 SiC가 적합하며, 낮은 출력 전력과 더 높은 주파수에서 구동된다면 GaN을 사용하는 것이 더 적합하다. 이론적 손실 분석은 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

참고 문헌

[1] J. Biela, M. Schweizer, S. Waffler et al., "Sic versus Si-evaluation of potentials for performance improvement of inverter and DC-DC converter systems by SiC power semiconductors", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 7, pp. 2872-2882, 2011

[2] A. Taylor, J. Lu, L. Zhu, K. (Hua) Bai, M. McAmmond, A. Brown, "Comparison of SiC MOSFET -based and GaN HEMT -based high-efficiency high-power-density 7.2 kW EV battery chargers", *IET Power Electron.*, May 2018