Wide Bandgap 전력 반도체 적용 PWM 인버터의 스위칭주파수vs손실 특성분석

김현빈*, 김동식*, 주동명**, 이병국**, 김종수*†
대진대학교*, 성균관대학교**

Analysis of Frequency-dependent Loss for PWM Inverter using Wide Bandgab Power Semiconductors

Hyun Bin Kim*, Dong Sik*, Dong Myoung Joo**, Byoung Kuk Lee**, Jong Soo Kim*†
Daejin University*, Sungkyunkwan University**

ABSTRACT

본 논문에서는 GaN FET을 적용한 단상 SPWM 인버터의 스위칭 주파수에 따른 효율 분석 결과를 제시한다. IGBT와 GaN FET의 특성을 상세히 분석하고, 각 스위치에 대해 스위칭 주파수를 10 – 100kHz로 Sweep한 경우의 이론분석 및 PSIM thermal module을 이용한 시뮬레이션을 수행한다. 이를 통해 인버터에 GaN FET적용 시 고효율 및 고전력 밀도 획득 가능성을 제시한다.

1. 서론

SPWM 인버터는 PCS (Power Conditioning System)뿐 아니라 생활가전제품에서 많이 사용되는 전력변환기기이다. 그러나 인버터에 사용되는 Si기반의 IGBT는 물성적인 한계에 도달하여 더 이상의 효율향상을 기대하기 어려운 상황이다. 따라서 Si의 물성적 한계를 극복하기 위해 WBG (Wide Bandgap) 전력반도체인 GaN (Gallium Nitride) FET과 SiC FET에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. GaN FET는 기존 Si Device에 비해 기생 Capacitance 성분들이 작기 때문에 스위치 턴 온과 턴 오프 시간이 작아지고 스위칭 손실이 감소한다. 따라서 GaN FET을 이용하면 SPWM 인버터의 전반적인 효율 향상을 기대 할 수 있다.

본 논문에서는 GaN FET을 적용한 단상 PWM 인버터의 성능 검증을 위하여 PSIM 시뮬레이션을 통해 스위칭 주파수를 10kHz 100kHz로 가변하면서 손실을 분석하고 스위치의 특성 및 시스템 효율 등을 상세히 분석한다.

2. WBG 전력반도체

2.1 WBG 전력 반도체의 물성적 특성

WBG 전력 반도체는 Si기반의 전력 반도체에 비해 에너지 밴드갭이 넓은 소자를 사용한 Device를 의미한다. 표 1은 기존 Si 및 WBG 특성을 가지는 GaN와 SiC의 특성 비교를 나타낸다[1]. Si 대비 WBG 반도체가 스위치에서 발생하는 손실이 낮으며 특히 GaN은 동일한 임계 항복전압을 갖는 다른 소자들 가운데 가장 낮은 도통저항($R_{DS(ON)}$)을 가지며 낮은 기생 Capacitance 덕분에 턴 온 및 턴 오프 시에 발생하는 스위칭손실도 작다. 또한 AlGaN과 GaN사이에 이종접합 특성에 의해 높은 전자이동도를 갖는 2차원 전자가스층 (2 dimensional electron gas)이 생성되기 때문에 Turn on 시 낮은 도통 손실을 나타낸다.

표 1 전력반도체용 반도체 소자의 특성 비교
Table 1 Characteristic comparison of power semiconductor devices

Parameter	Si	SiC	GaN
E_G (eV)	1.12	3.2	3.4
E_{BR} (MV/cm)	0.3	3.5	3.3
V_S (x 10^7cm/s)	1	2	2.5
μ (cm^2/Vs)	1350	900	990 – 2000

표 2 IGBT vs GaN FET 주요 파라미터
Table 2 IGBT vs GaN FET main parameters

Parameter	IGBT	GaN FET	Remarks
$V_{DC/CE}$	650V	650V	T_j=100℃
I_{DC}	18A	15A	
$R_{DS(ON)}/V_{CE(SAT)}$	2.1V	85mΩ	
Q_G	38nC	15.7nC	41%
t_r / t_f	7ns/16ns	5ns/4ns	
E_{on} / E_{off}	180μJ/60μJ	15μJ/20μJ	8.3/33%
Q_{rr}	190nC	55nC	29%
t_{rr}	50ns	18ns	36%

2.2 IGBT vs GaN FET

IGBT와 GaN FET의 성능을 비교하기 위해 전류 정격이 비슷한 두 소자[GaN FET (RFJS1506Q)와 IGBT (IKP15N65F5)]를 선정하였다. 특히 IGBT는 고속 스위칭 주파수에서의 비교를 위해 최대 120kHz까지 동작 가능한 소자를 선정하였다.

표 2에 두 소자의 주요 Parameter를 나타내었으며 손실을 결정하는 주요 Parameter인 $V_{CE(SAT)}$, $R_{DS(ON)}$, E_{on}, E_{off} 및 Q_{rr}이 GaN FET가 IGBT보다 상대적으로 작은 것을 보여준다.

$$P_{cond,GaN} = R_{DS(ON)} \cdot I_D^2 \quad (1)$$

$$P_{cond,IGBT} = V_{CE(SAT)} \cdot I_C \quad (2)$$

GaN FET의 도통손실은 식 (1)과 같이 $R_{DS(ON)}$ 및 스위치 전류의 제곱에 비례한다. 반면 IGBT의 도통손실은 식 (2)와 같이 $V_{CE(SAT)}$과 스위치에 흐르는 전류의 곱으로 나타난다. 즉 선정한 소자에 대해서 $V_{CE(SAT)}$과 $R_{DS(ON)}$에 의한 도통손실이 같아지는 전류의 값은 24.7A이고 그 이하에서는 GaN FET의 도통손실이 IGBT보다 작다. 또한 GaN FET의 t_r, t_f 및 Q_G가 작기 때문에 스위칭 손실이 작으며 인버터와 같이 역병렬 다이

표 3 인버터 설계 사양
Table 3 Inverter design specifications

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{in}	350 [V]	F_{sw}	10 100 [kHz]
Rated P_{out}	1000 [W]	L_F	1.85 [mH]
V_{out}	220 [V_{rms}]	C_F	3.3 [μF]

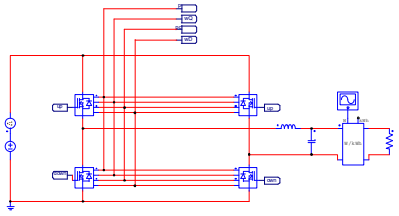
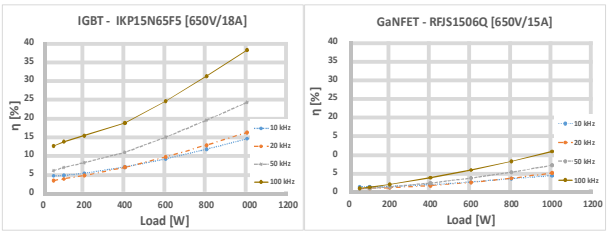


그림 1 시뮬레이션 플랫폼
Fig. 1 Simulation platform



(a) IGBT (b) GaN FET

그림 2 IGBT와 GaN FET의 주파수별 스위치 손실
Fig. 2 Frequency-dependent switch loss of the IGBT and GaN FET

오드로 전류가 흐르는 Topology에서는 역병렬 다이오드의 손실을 결정해주는 Q_{rr} 및 t_{rr}도 GaN FET가 더 작기 때문에 GaN FET을 적용한 전력 변환 시스템은 IGBT 인버터 시스템보다 낮은 스위치 손실을 가져 효율 증가 및 전력밀도가 향상된다.

3. PWM 인버터의 손실특성 분석

3.1 스위칭 주파수에 따른 손실특성

그림 1은 단상 SPWM 인버터의 Thermal module을 이용한 PSIM 시뮬레이션 플랫폼을 나타낸다. 각 소자의 데이터시트에 기반하여 스위치 손실을 도통손실과 스위칭 손실로 나누어 분석하였다. 분석한 인버터의 사양은 표 3과 같으며 스위칭 주파수를 10kHz – 100kHz 범위에서 효율을 분석하였다.

그림 2은 주파수별 스위치 손실을 비교한 그래프이다. 모든 주파수에서 GaN FET의 손실이 IGBT보다 항상 낮은 것을 보여준다. 50 kHz, 1 kW일 때 스위치의 손실은 IGBT에서는 24 W, GaN FET에서는 7 W로 3.4배 차이난다. 50 kHz, 50 W일 때 IGBT의 스위치 손실은 5.69 W이고 GaN FET은 0.56 W로 GaN FET의 손실이 10배 작다. 이는 도통손실에 영향을 주는 $V_{CE(SAT)}$과 $R_{DS(ON)}$이 GaN FET이 상대적으로 작으며 스위칭 손실에 영향을 주는 t_r, t_f 및 Q_G또한 GaN FET이 작기 때문이다. 두 소자의 50 kHz일 때 스위치의 도통손실(P_{cond})과 스위칭손실(P_{sw})을 부하별로 비교하면 그림 3과 같으며 전부하에서 GaN FET의 도통손실은 25%, 스위칭 손실은 30%로 나타난다.

스위치를 제외한 모든 손실이 전체 시스템의 2%라고 가정하면 50 W – 1 kW 범위에서 GaN FET을 이용한 인버터는 96 – 97%의 효율을 가지며 IGBT를 이용한 인버터는 78 – 96%의 효율을 가진다. 특히 GaN을 이용한 인버터는 IGBT를 이용한 인버터보다 경부하에서 효율이 12% 향상되며 평균적으로는

표 4 주파수에 따른 필터와 출력전류 리플 비교
Table 4 Filters and output current ripple according to frequency

Parameter	F_{sw}	L	$\triangle I_L$
GaN FET	80kHz	0.625mH	0.252A
IGBT	20kHz	2.5mH	0.258A

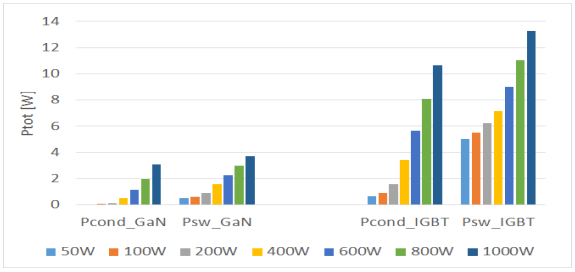


그림 3 50kHz에서의 IGBT 및 GaN FET의 손실 성분 분석
Fig. 3 Loss analysis for the IGBT and GaN FET at 50kHz

1.5% 향상된다. 따라서 GaN FET을 이용한 전력변환장치를 사용한다면 스위치손실이 기존 IGBT보다 작기 때문에 효율이 증가한다. 또한 스위치에서 발생하는 손실이 작아지기 때문에 필요한 방열판의 열저항이 높아지며 Fan과 같은 냉각장치가 불필요하므로 전체적인 시스템의 전력밀도향상이 가능하다.

3.2 주파수 증가에 따른 필터크기 감소

출력전류의 리플값 ($\triangle I_L$)은 LC필터의 값과 스위칭 주파수에 의해 결정된다. GaN FET은 IGBT보다 tr과 tf가 작기 때문에 스위칭 속도가 빠르고 높은 스위칭 주파수에서 동작시킬 수 있다. 표 4는 GaN 인버터에서 스위칭 주파수를 증가시키고 L 필터 값을 감소시켰을 때 출력 전류의 리플 크기를 나타낸다.

$$E_L = \frac{1}{2} L I_L^2 \quad (2)$$

인덕터에 저장되는 에너지는 식 (2)로 나타낼 수 있으며 $\triangle I_L$을 고정시키고 스위칭 주파수를 증가시키면 상대적으로 인덕터에 저장되는 에너지를 줄일 수 있다. 따라서 인덕터의 크기가 감소하며 전력 밀도향상이 가능하다.

4. 결론

본 논문에서는 기존 IGBT와 WBG 전력반도체인 GaN FET의 특성을 분석하고 스위칭 주파수 증가 시에 IGBT와 GaN FET을 적용한 PWM Inverter의 스위치의 효율을 PSIM thermal module을 통하여 분석하였다. 일단 비슷한 정격의 두 소자를 선정하여 각각의 스위치 효율을 시뮬레이션으로 분석을 하였다.

Acknowledgment
이 논문은 2014년도 정부(매래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. NRF 2013R1A1A1076109)

참 고 문 헌

[1] 안정훈, 이병국, 김종수 “Si MOSFET과 GaN FET Power System 성능 비교 평가” 전력전자학회 2014년도 논문지, pp.283-289, 2014