

SiC 하이브리드 모듈을 적용한 근거리용 7kW Inverter 동작 안정성에 대한 연구

전준혁*,**, 경신수***, 김희준****

Research on operation stability of 7kW Inverter for short distance vehicle using SiC Hybrid module

Joon-Hyeok Jeon*,**, Sin-Su Kyoung***, Hee-Jun Kim****

요약 본 논문은 SiC Hybrid module를 적용한 7kW 인버터의 동작 안정성에 관한 것으로 손실 방정식과 시뮬레이션 결과를 비교하여 시뮬레이션 결과의 유효성을 검증하였으며, 시뮬레이션을 통해 Si module과 SiC Hybrid module의 스위칭 손실과 다이오드 손실을 비교하였다. 손실 방정식 계산을 통하여 SiC Hybrid module의 도통 손실은 168W, 스위칭 손실은 9.3W, 다이오드 손실은 10.5nW의 결과를 나타내었으며, 시뮬레이션 결과와 비교하였을 때 유사한 값을 나타내었다. 이를 바탕으로 Si module과 SiC Hybrid module의 시뮬레이션 결과 값 비교 결과, Si module의 총 소자 손실 값은 246.2W, SiC Hybrid module의 총 소자 손실 값은 189.9W를 나타내었으며, 손실 차이 값은 56.3W로써 약 0.8W의 효율 차이를 보였다. 이로 인하여 SiC SBD의 Reverse recovery 특성을 검증하였다. 또한 고온 포화상태에서 SiC Hybrid module 및 Si module의 안정성을 확인하기 위하여 온도 포화 테스트를 진행하였으며, Si module의 경우, 출력전력 4kW에서 동작을 멈추었고, SiC Hybrid module은 7kW까지 동작을 확인하였다. 이를 바탕으로, 효율 그래프와 온도 그래프를 제시하였으며, Si module은 4kW까지, SiC Hybrid module은 7kW까지 그래프로 나타내었다.

Abstract This paper is concerned with the operating stability of 7kW inverter using SiC hybrid module and verifies the validity of the simulation results by comparing the result of the loss equation and the simulation result, Simulation results using Si module and SiC hybrid module are compared to compare switch loss and diode loss. Through the loss equation calculation, the conduction loss of SiC Hybrid module is 168W, switching loss is 9.3W, diode loss is 10.5nW, When compared with the simulation results, similar values were shown. As a result of comparing the simulation results of the Si module and the SiC Hybrid module, The total device loss of the Si module was 246.2W, and the total device loss of the SiC Hybrid module was 189.9W. The loss difference was 56.3W, which was about 0.8W. thereby verifying the reverse recovery characteristics of the SiC SBD. In addition, temperature saturation test was conducted to confirm the stability of SiC Hybrid module and Si module under high temperature saturation, In the case of the Si module, the output power was stopped at 4kW, and the SiC Hybrid module was confirmed to operate at 7kW. Based on this, an efficiency graph and a temperature graph are presented, and the Si module is graphed up to 4kW and the SiC Hybrid module is graphed up to 7kW.

Key Words : SiC Hybrid Module, Inverter, SiC SBD, Energy efficiency, Hybrid Electric Vehicle

This work was supported by the Technology Innovation Program (or Industrial Strategic Technology Development Program-Material Parts Industry Future Growth Driving Business)(20003935.Development of low loss high efficiency high reliability 1700V Grade Trench Gate SiC power semiconductor for renewable energy conversion system for low carbon emission)funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE,Korea)

*Department of Electronic Systems Engineering, Hanyang University(Joonhyeok91@hanyang.ac.kr)

**PowerCubeSemi, Inc.(jhjeon@powercubesemi.com)

***Corresponding Author : PowerCubeSemi, Inc.(sskyoung@powercubesemi.com)

Received October 10, 2019

Revised October 18, 2019

Accepted October 18, 2019

1. 서론

최근 Global 환경문제의 극복과 화석연료 고갈에 따른 유가상승의 문제를 해결하기 위하여 전세계적으로 전기자동차 개발이 경쟁적으로 진행되고 있으며, 근거리용 전기자동차는 전기자동차 산업에서 핵심적으로 개발되고 있는 분야이다. 근거리용 전기자동차 인버터는 출력전력이 크지 않기 때문에 고효율 모터 제어 성능의 특성을 가져야하며, 고온에서의 동작 안정성이 필수적으로 요구된다. 하지만 최근 대두되고 있는 ESS 폭발사고, 배터리 발열 등, 온도 상승으로 인해 안전사고로 이어지고 있는 실정이다.

SiC 전력반도체는 산업기기, 태양전지, 전기차, 철도 등 전력전자분야에서 종래의 실리콘 반도체보다 전력변환 손실이 적고, 재료 물성이 우수한 반도체로 알려지면서 그 응용분야의 폭을 확대하고 있다.[1]

본 논문에서는 고온 동작 안정성과 높은 효율이 요구되는 근거리 전기자동차용 인버터를 구성하고, Si module과 SiC Hybrid module의 동작 안정성을 검증하였고, 손실계산식과 시뮬레이션 결과를 통해 Inverter System의 스위치 손실 및 다이오드 손실을 비교 분석하였다. 이 비교 실험을 통하여 SiC Hybrid module을 적용한 Inverter System이 Si module을 적용한 Inverter System보다 고온상황에서 더 우수한 동작 안정성을 보임을 입증하였고 손실 분석 또한 우수한 결과를 얻을 수 있었다. [2][3][4]

2. 본론

2.1 SiC Hybrid Module

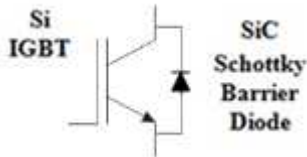


그림 1. SiC 하이브리드 모듈
Fig. 1. SiC Hybrid module

그림 1은 SiC 하이브리드 모듈이며, SiC SBD (Schottky Barrier Diode)를 바디 다이오드로 사용하는 Si IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)이다. SiC Hybrid module은 SiC SBD의 역회복 특성을 이용하여 다이오드 역회복 손실을 줄일 수 있으며[5], 이로 인하여 전력반도체 소자의 전력 손실이 작아지기 때문에 전체시스템의 효율을 높일 수 있다[6]. 또한, SiC를 다수 캐리어 디바이스 구조인 SBD 구조로 설계하기 때문에, 600V 이상의 고내압 동작에 유리하다.

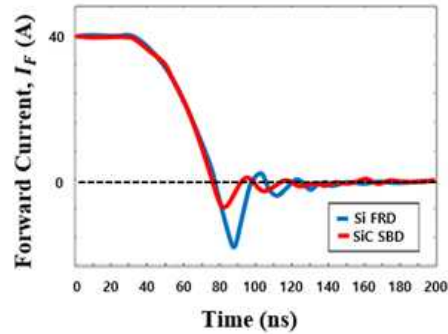


그림 2. Si FRD와 SiC SBD의 I_F 파형
Fig. 2. I_F Waveforms of Si FRD and SiC SBD

Si FRD(Fast Recovery Diode)는 순방향에서 역방향으로 전환되는 순간에 큰 과도 전류가 흐른다. 이 순간에 다이오드는 역바이어스 상태가 되어 큰 손실을 발생시킨다. Si FRD는 소수 캐리어 디바이스이기 때문에, 순방향 상태 일 때 드리프트층 내에 축적된 소수 캐리어가 소멸되는 시간 동안 역바이어스 상태가 되기 때문이다. 순방향 전류가 크고 온도가 높을수록 역회복 시간 및 전류는 증가하기 때문에 손실은 많아진다[7]. SiC SBD의 경우, 소수 캐리어를 전기 전도에 사용하지 않는 다수 캐리어 디바이스이기 때문에 소수 캐리어의 축적이 발생하지 않는다. 그렇기 때문에 역회복 시간, 전류와 손실이 작으며, 역회복 전류에 의한 누설 전류 발생도 줄일 수 있다[8][9]. 그림 2는 Si FRD와 SiC SBD의 파형이다. 그림과 같이, Si FRD와 대비하여 SiC SBD의 역회복 시간 및 전류가 작음을 확인할 수 있다.

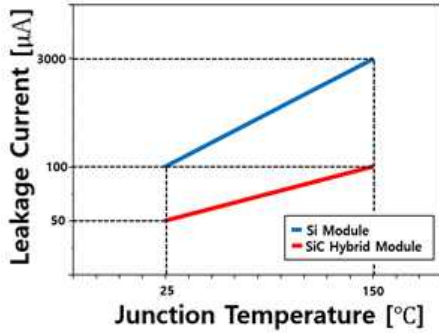


그림 3. 접합 온도 vs 누설전류
Fig. 3. Junction Temperature vs Leakage Current

그림 3은 Si module과 SiC Hybrid module의 열저항 비교 그래프이다. 그래프의 기울기는 열저항(R_{th})을 의미하며 일반적으로, Si module의 열저항 값이 SiC Hybrid module의 열저항 값보다 높다[10]. 열저항값이 높을수록 전력 증가에 따른 온도 상승율이 높으며, 이것을 바탕으로 최대 소비전력 지점을 알 수 있다. 이 원리를 식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$T_j = R_{th} \cdot P + T_a \quad (1)$$

T_a 는 주위 온도이며, P는 소비전력이고, T_j 는 소자의 온도이다. Si module의 경우, 열저항 값이 높기 때문에 통상 최대 정격온도인 150°C에 도달하는 소비전력 지점이 낮으며 시스템의 출력전력 상승에 한계가 있다. SiC Hybrid module의 경우, 열저항 값이 낮기 때문에 높은 출력전력에서도 안정성 있는 동작이 가능하다.

2.2 Loss Analysis

IGBT에 의해 발생하는 손실은 도통 손실(Conduction loss), 스위칭 손실(Switching loss), 출력 기생 커패시터에 의한 손실(Parasitic output capacitance loss)로 나누어 생각할 수 있다.

IGBT의 도통 손실은 온상태 콜렉터-이미터 전압($V_{CE(sat)}$)과 콜렉터 전류(I_C)의 곱으로 구할 수 있으며, 도통 손실은 식 (2)와 같다.

$$P_{COND} = V_{(CE(sat))} \cdot I_C \quad (2)$$

IGBT의 스위칭 손실은 스위치의 콜렉터-이미터 전압(V_{CE})과 콜렉터 전류(I_C)의 교차에 의한 성분, 바디 다이오드의 역회복 전하(Q_{rr})와 역방향 회복 시간(t_{rr})에 의한 성분으로 나눌 수 있다. V_{CE} 와 I_C 의 교차에 의한 손실 성분은 턴온 구간에서 발생하는 손실과 턴오프 구간에서 발생하는 손실로 구분할 수 있다. 턴온 손실은 전류상승시간(t_{ri})과 전압하강시간(t_{fv}) 동안의 교차성분을 계산하며, 턴오프 손실은 전압상승시간(t_{rv})과 전류하강시간(t_{fi}) 동안의 교차성분을 계산한다. IGBT의 턴온 구간에서의 에너지 손실은 식 (3)과 같으며, 턴오프 구간에서의 에너지 손실은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} E_{SW(ON)} &= \int_0^{(tri+tfv)} V_{CE}(t) \cdot I_C(t) dt \\ &= V_{CE} \cdot I_{C(ON)} \cdot (tri + tfv) / 2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_{SW(OFF)} &= \int_0^{(trv+tfi)} V_{CE}(t) \cdot I_C(t) dt \\ &= V_{DC} \cdot I_{C(OFF)} \cdot (trv + tfi) / 2 \end{aligned} \quad (4)$$

IGBT의 바디 다이오드 역회복에 의한 에너지 손실 식은 식 (5)와 같으며, SiC SBD는 t_{rr} 이 작기 때문에 Q_{rr} 영역이 현저히 줄어들어, 바디 다이오드 역회복에 의한 에너지 손실을 0에 가깝도록 줄일 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{Diode(OFF)} &= \int_0^{(tri+tfv)} V_D(t) \cdot I_D(t) dt \\ &= 1/4 \cdot Q_{rr} \cdot V_{Drr} \end{aligned} \quad (5)$$

이때, V_{Drr} 은 바디 다이오드가 턴온 시에 다이오드 양단에 인가되는 전압이며, 최악의 경우에는 V_{CE} 의 크기와 같다. 바디 다이오드의 턴온 손실은 매우 작으므로 본 논문에서는 계산식에서 무시한다. 출력 기생 커패시터에 의한 손실 또한 다른 손실들에 비해 굉장히 미세하기 때문에, 계산식에서 무시한다.

IGBT에서 발생하는 전체 손실은 IGBT의 도통

손실, 스위칭 턴온/턴오프 손실, 바디 다이오드 손실에 의한 손실로 구성되며 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{IGBT} &= P_{COND} + P_{(SW(ON/OFF))} + P_{(Diode(OFF))} \\
 &= V_{CE(sat)} \cdot I_C \\
 &+ [(V_{CE} \cdot I_{C(ON)} \cdot (tr_i + tf_v)/2) \\
 &+ (V_{DC} \cdot I_{C(OFF)} \cdot (tr_v + tf_i)/2) \\
 &+ (1/4 \cdot Q_{rr} \cdot V_{Drr})] \cdot f_{sw} \quad (6)
 \end{aligned}$$

Inverter에 사용된 SiC Hybrid module은 PCS社의 PCS120M065H이며, 650V/120A 소자이다. 식 (6)에 소자 Parameter 값을 대입하여 SiC Hybrid module의 전체 손실을 계산하였으며, 소자의 파라미터 값은 표1에 표시되어 있다.

표 1. SiC 하이브리드 모듈의 파라미터
Table 1. Parameter of SiC Hybrid Module

Parameter	Unit	Value
V_{CE}	[V]	650
I_C	[A]	120
$V_{CE(sat)}$	[V]	1.4
$I_{C(on)}$	[A]	43.5
I_{CES}	[μ A]	30
$t_{d(on)}$	[ns]	16
t_r	[ns]	28
$t_{d(off)}$	[ns]	120
t_f	[ns]	17
Q_{rr}	[μ C]	0.75
V_{Drr}	[V]	3.5
f_{sw}	[kHz]	15

$$\begin{aligned}
 P_{IGBT} &= P_{COND} + P_{SW(ON/OFF)} + P_{(Diode(OFF))} \\
 &= 1.4 \times 120 + [(650 \times 43.5 \times 44 \times 10^{-9}/2) \\
 &+ (650 \times 30 \times 10^{-6} \times 137 \times 10^{-9}/2) \\
 &+ (1/4 \times 0.75 \times 10^{-6} \times 3.5)] \times 15 \times 10^3 \\
 &= 168 + (622\mu + 1.3n + 0.7\mu) \times 15 \times 10^3 \\
 &\approx 177.3 [W]
 \end{aligned}$$

계산 결과, SiC Hybrid module의 도통 손실은

168W, 스위칭 손실은 9.3W, 다이오드 손실은 10.5nW로 계산되었다.

3. 실험 결과

3.1 Simulation

본 논문에서는 손실 분석 계산 결과의 타당성 검증 및 Si module과 SiC Hybrid module의 손실 비교를 위하여 Simulation을 진행하였다. PSIM Tool을 사용하였으며, Thermal module 기능을 이용하여 소자의 Parameter를 입력하였다.

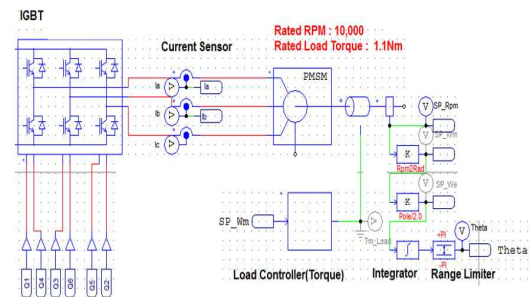


그림 4. 시뮬레이션 회로
Fig. 4. Simulation schematic

그림 4는 시뮬레이션에 사용된 PSIM schematic이다. 기생성분은 무시하였으며, Thermal module을 사용하기 위한 회로를 추가하여 인버터 회로를 구현하였다.

Si module과 SiC Hybrid module 모두 적용하여 시뮬레이션을 진행하였고, 이론적인 손실 값과 SiC Hybrid module 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, Si module 시뮬레이션 결과와 SiC Hybrid module 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

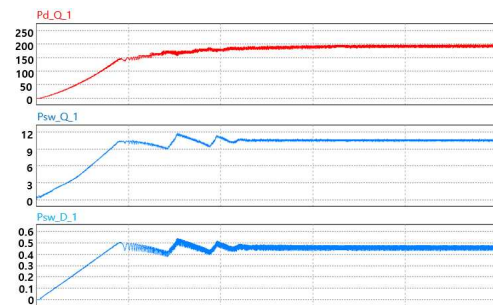


그림 5. SiC 하이브리드 모듈의 시뮬레이션 결과
Fig. 5. SiC Hybrid Module Simulation results

그림 5는 SiC Hybrid module을 적용한 시뮬레이션 결과 값이며, 첫번째 파형(Pd_Q_1)은 IGBT 도통 손실(P_{COND}) 파형이며, 두번째 파형(Psw_Q_1)은 IGBT 스위칭 손실($P_{SW(ON/OFF)}$) 파형이고, 세번째 파형(Psw_D_1)은 바디 다이오드 역회복 손실($P_{Diode(OFF)}$) 파형이다. 과도상태 이후 정상상태에 도달했을 때의 손실 값을 측정 하였으며, 정상 상태에서의 시뮬레이션 손실 값은 아래의 표2와 같다.

표 2. 이론 값과 시뮬레이션 값의 비교
Table 2. Comparison of theoretical and Simulation value

Type of loss	Theoretical value [W]	Simulation Value [W]
P_{COND}	168	179
$P_{SW(ON/OFF)}$	9.3	10.5
$P_{Diode(OFF)}$	10.5×10^{-9}	0.4

이론에 의한 손실 값과 시뮬레이션 손실 값을 비교한 결과, 손실 값이 거의 일치함을 확인하였다. 이로 인해, 이론 계산 식과 시뮬레이션 구현이 타당함을 확인하였으며, 이를 바탕으로 Si module과 SiC Hybrid module 적용 결과를 비교하였다.

Si module은 IXYS社의 IXXN110N65B4H1을 사용 하였으며, 올바른 비교를 위하여 SiC Hybrid module과 같은 650V급 소자를 선정하였다.

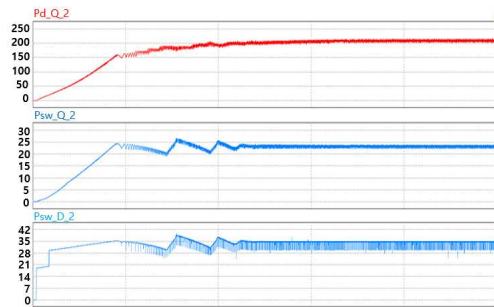


그림 6. Si 모듈의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Si Module Simulation results

그림 6은 Si 모듈을 적용한 인버터의 시뮬레이션 파형을 나타내며, SiC Hybrid module 시뮬레이션 측정방법과 동일한 방법으로 결과 값을 측정하였다. Si 모듈을 적용한 인버터와 SiC Hybrid module을

적용한 인버터의 시뮬레이션 결과는 아래 표에 나타 내었다.

표 3. Si 모듈과 SiC 하이브리드 모듈의 비교
Table 3. Comparison of Si module and SiC Hybrid module

Type of loss	Si Module results [W]	SiC Hybrid Module results [W]
P_{COND}	189.2	179
$P_{SW(ON/OFF)}$	22	10.5
$P_{Diode(OFF)}$	35	0.4
P_{Total}	246.2	189.9

Si module과 SiC Hybrid module을 적용하여 시뮬레이션 결과를 비교한 결과, SiC Hybrid module의 손실 값이 모든 부분에서 낮게 나왔으며, 총 손실 값이 56.3W 작게 측정되었다.

SiC SBD는 역회복 손실이 매우 낮으며, 이것은 인버터 시스템 효율에 직접적인 영향을 미친다.

3.2 Inverter

본 논문에서는 소자 테스트를 위하여 3상 유도 전동기 구동을 위한 7kW급 인버터를 제작하였으며, Si module 과 SiC Hybrid module을 적용하여 효율 및 온도포화 비교테스트를 진행하였다.

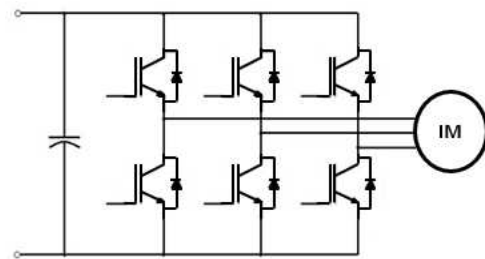


그림 7. 인버터 회로도
Fig. 7. Inverter schematic

그림 7은 인버터의 구성도이며, DC 전압을 인가 하여, 소자의 스위칭 동작을 통해 AC 전압으로 정류 하여 3상 유도전동기를 구동한다. 스위칭 소자를 제외한 회로 및 수동소자들이 전체 시스템 효율에 미

치는 영향을 최소화하기 위하여 평활 커패시터에 DC 입력을 직접 인가하였으며, 전동기의 자속을 일정하게 유지하고 가변속 운전에 대하여 전동기의 효율 및 역률을 저하시키지 않도록 하기 위하여 V/F 제어 방식을 이용하였다.

표 4. 인버터 시스템 성능
Table 4. Inverter System Performance

Parameter	Value	Unit
V_{dc}	260	[V]
V_{out}	200	[V]
I_{out}	35	[A]
P_{out}	7	[kW]
f_{sw}	15	[kHz]

표 4는 인버터 시스템의 성능이며, 인버터의 입력 전압은 260V이며, 출력 전압은 200V 이다. 실험의 주요 목적은 소자의 손실 비교 및 동작 안정성 비교이기 때문에 외부적 요인을 최대한 배제하고자, 스위칭 주파수를 비교적 낮은 주파수인 15kHz로 설정하였다.

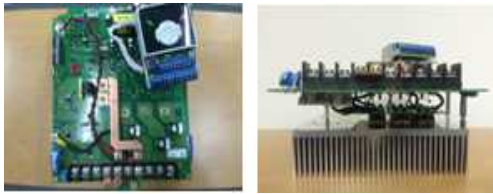


그림 8. 인버터
Fig. 8. Inverter

적용 소자는 SOT-227 Type이며, 소자 변경을 위해 소자 커넥터 보드를 제작하여 연결하였다. 또한, 동작 안정성 확보를 위하여 방열판을 부착하였으며, 열 순환을 위하여 12V Fan 2개를 사용하였고, 실험 조건은 같게 하여 진행하였다.

3.3 Results

Si module을 적용한 인버터의 경우, 출력 전력 4kW 지점에서 소자가 파괴되며 동작 정지하였다. SiC Hybrid module을 적용한 인버터의 경우, 출력 전력 7kW 지점까지 정상 동작하는 것을 확인하였다. 출력 파형은 인버터의 최대 출력 지점에서 측정

하였으며, Si module은 4kW, SiC Hybrid module은 7kW 지점에서 측정하였다. 소자별 입출력 전압 및 전력은 그림9, 그림10과 같다.

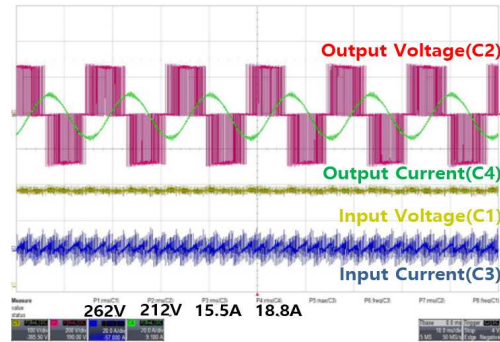


그림 9. Si 모듈의 파형
Fig. 9. Si Module waveforms

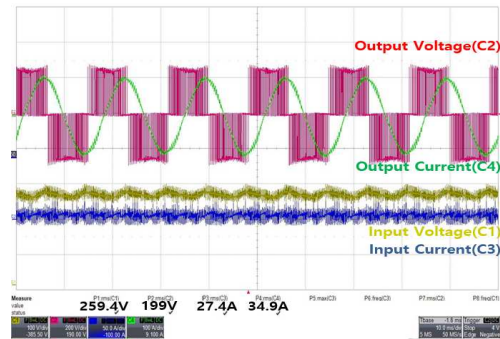


그림 10. SiC 하이브리드 모듈의 파형
Fig. 10. SiC hybrid module waveforms

Si module 적용 인버터의 경우, 출력 전압 212V, 최대 출력 전류 18.8A이며, SiC Hybrid module의 경우, 출력 전압 199V, 최대 출력 전류 34.9A 이다.

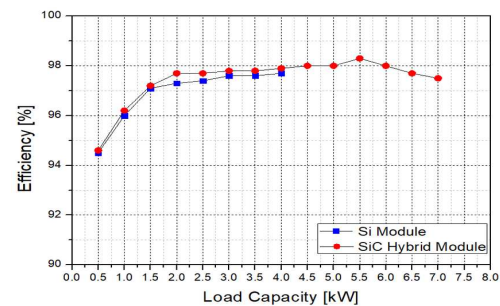


그림 11. 효율 비교
Fig. 11. Comparison of efficiency

그림 11은 Si module과 SiC Hybrid module의 효율 비교 그래프이다. 전 구간에서 SiC Hybrid module 적용 인버터의 효율이 높은 것을 확인하였으나 차이가 크지 않으며, 최대효율 지점에서 98%의 효율을 달성하였다. 온도 포화 테스트 결과, Si module 적용 인버터의 경우, 소자 케이스 온도 40°C에서 동작 정지하였으나 SiC Hybrid module 적용 인버터의 경우, 45°C 이상에서도 안정성을 보이며 동작하였다. 그림 12는 온도포화 테스트 결과를 나타낸 그래프이다.

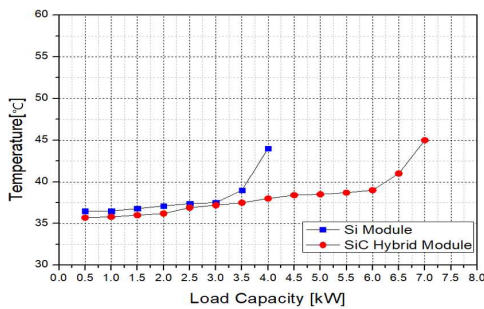


그림 12. 온도 비교
Fig. 12. Comparison of temperature

4. 결론

시뮬레이션을 통해 Si module과 SiC Hybrid module을 적용한 결과, SiC Hybrid module의 손실은 총 189.9W, Si module의 손실은 총 246.2W로 SiC Hybrid module의 손실이 약 56.3W 작다는 점을 확인하였고, 0.8W의 효율 차이를 보였다. 7kW Inverter를 제작하여 온도 포화테스트를 진행한 결과, Si module 적용의 경우 출력전력 4kW에서 동작이 멈추었으며, SiC Hybrid module 적용의 경우 출력전력 7kW에서 약 45°C로 측정되었고, 보다 나은 동작 안정성을 보였다. 케이스 온도가 40°C 이상일 경우, 소자의 접합 온도는 100°C를 넘어가기 때문에 고온에서 동작이 불안정한 Si module은 동작이 멈추게 된다. 결론적으로, 출력전력 전 구간에서 SiC Hybrid module 적용의 경우 케이스 온도

가 Si module 적용의 경우보다 더 낮다는 것을 확인할 수 있었으며, 측정 가능한 전 구간에서 SiC Hybrid module의 효율이 더 높게 나타나는 것을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] Chao, Zhang et al. "a DC-DC Boost Converter Based on SiC MOSFET and SiC SBD." 2011 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits (2011)
- [2] Aghdam, M. G. Hosseini, and T. Thiringer. "Comparison of SiC and Si Power Semiconductor Devices to Be Used in 2.5 kW DC/DC Converter." 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS) (2009)
- [3] Elasser, A. et al. "A Comparative Evaluation of New Silicon Carbide Diodes and State-of-the-Art Silicon Diodes for Power Electronic Applications." IEEE Transactions on Industry Applications 39.4 (2003): 915-921
- [4] Bhatnagar, M. ,B.J. Baliga. "Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for Power Devices." IEEE Transactions on Electron Devices 40.3 (1993): 645-655
- [5] Han, Timothy Junghee, Jared Preston, and David Ouwerkerk. "6.6 kW on-vehicle charger with a hybrid Si IGBTs and SiC SBDs based booster power module." Journal of Power Electronics vol. 13, no. 4, 2013, pp. 584-91
- [6] Pai, Ajay Poonjal, Tomas Reiter, and Martin Maerz. "Mission profile analysis and calorimetric loss measurement of a SiC hybrid module for main inverter application of electric vehicles." 2017 IEEE International Workshop Oon Integrated

Power Packaging (IWIPP). IEEE, 2017

[7] Takeuchi, Y., et al. "A novel hybrid power module with dual side-gate HiGT and SiC-SBD." 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). IEEE, 2017

[8] Wang, Baozhu, et al. "Characterization of 1.2 kV SiC super-junction SBD implemented by trench and implantation technique." 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). IEEE, 2018

[9] Wang, Haining, et al. "1700V Si-IGBT and SiC-SBD hybrid module for AC690V inverter system." 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA). IEEE, 2014

[10] Xu, Fan, et al. "High temperature packaging of 50 kW three-phase SiC power module." 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. IEEE, 2011

경 신 수(Sin-Su Kyoung)



- 2006년 고려대학교 전기전자공학과 졸업
- 2016년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(박사)
- 2009년~2013년 삼성전자 LSI 선임연구원
- 2013년~현재 파워큐브세미(주) 연구소장

〈관심분야〉 반도체 소자, 소자 설계, 반도체 공정

김 희 준(Hee-jun Kim)

[정회원]



- 1976년 한양대 전자 공학과 졸업.
- 1978년 동 대학원 전자 공학과 졸업(석사).
- 1986년 일본 큐슈대 전자공학과 졸업(공학박).
- 1987년 ~ 현재 한양대 전자 공학과 교수.
- 2015년 대한전기학회 회장. IEEE 수석 멤버.

〈관심분야〉 전자회로, 전력전자, 전력변환

저자약력

전 준 혁(Joon-Hyeok Jeon)

[정회원]



- 2014년 목포해양대학교 전자과 졸업.
- 2017년 한양대학교 대학원 전자시스템 공학과 수료 (석·박사)
- 2017년 ~ 현재 동 대학원 전자시스템 공학과 박사 과정

〈관심분야〉 전력전자, 전력변환