

SiC MOSFET

# 제 4 세대 SiC MOSFET 를 사용한 5kW 인버터 회로

어플리케이션 노트 「5kW 고효율 Fan-less 인버터 회로」 (64AN087K Rev.001) (\*1)에서, 제 3 세대 SiC MOSFET 를 사용한 고효율 인버터 회로에 대해 설명했습니다. 본 어플리케이션 노트에서는 스위칭 디바이스를 제 4 세대 SiC MOSFET 로 대체하여, 성능 개선 효과를 확인해 보겠습니다.

본 평가는 파워 어시스트 테크놀로지 주식회사 (<https://www.power-assist-tech.co.jp/>)와 공동으로 실시하였습니다.

## Full-bridge 타입 인버터 회로에서의 대체 평가

그림 1은 이번에 평가한 Full-bridge 타입 인버터 회로를 채용한 플랫폼의 외관이며, 그림 2는 기본 회로 구성을 나타낸 것입니다.



그림 1. 평가 플랫폼

5kW를 출력시키기 위해 스위칭 디바이스를 병렬 접속으로 사용하였으며, arm 수는 2개, 사용한 스위칭 디바이스는 총 8개입니다. 이러한 8개의 스위칭 디바이스를 제3세대 SiC MOSFET / 제4세대 SiC MOSFET로 대체하여, 인버터 효율을 측정하고 비교하였습니다.

그리고, 본래 IGBT를 베이스로 한 기본 설계이므로 (\*1), 발진 주파수를 20kHz로 설정하여 사용하는 리액터가 커졌지만, 이번에는 SiC MOSFET끼리의 비교이므로, 디바이스 간 성능 차이를 쉽게 확인할 수 있도록 주파수를 40kHz로 설정하였습니다.

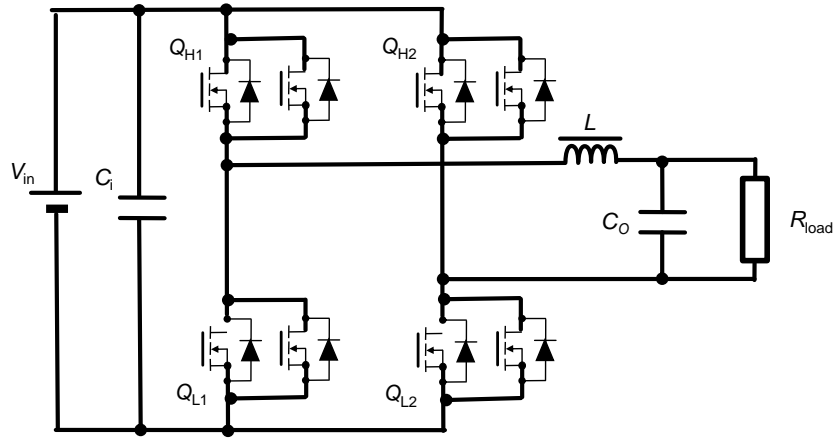


그림 2. 회로 구성도

## 효율 평가

어플리케이션 노트 「5kW 고효율 Fan-less 인버터 회로」(\*1)에서는, 입출력 변환 효율을 사용하여 IGBT와의 차이점을 비교 설명했지만, 본 어플리케이션 노트에서는 Full-bridge 타입 인버터 회로에서 제3세대 SiC MOSFET와 제4세대 SiC MOSFET를 동일한 조건에서 동작시켜, 변환 효율을 측정하였습니다.

표 1은 평가 조건 및 회로 정수를 정리한 것입니다.

표 1. 평가 조건과 사용 부품

Items	제3세대	제4세대
Switching Devices	650V, 30mΩ (SCT3030AL)	750V, 26mΩ (SCT4026DE)
Input voltage ( $V_{in}$ )	DC 320 V	
Input capacitance ( $C_i$ )	560μF × 4	
Switching frequency ( $f_{sw}$ )	40kHz	
Leakage / Smoothing inductance ( $L$ )	300μH × 4 (BCH61-35150)	
Copper wire resistance of the reactor	20mΩ × 4	
Output capacitance ( $C_o$ )	1μF × 8	
Output voltage ( $V_{out}$ )	AC 200 V	

그림 3은 출력전력  $P_{out}$ 을 가로축으로 하여 인버터의 효율을 나타낸 것입니다. 효율  $\eta$ 은 입력전력  $P_{in}$ 과  $P_{out}$ 의 비율  $P_{out}/P_{in}$ 으로 산출하였습니다. 단, 전력의 총 손실 ( $P_{total} = P_{in} - P_{out}$ )에 MOSFET의 게이트 구동 전력은 포함되어 있지 않습니다.

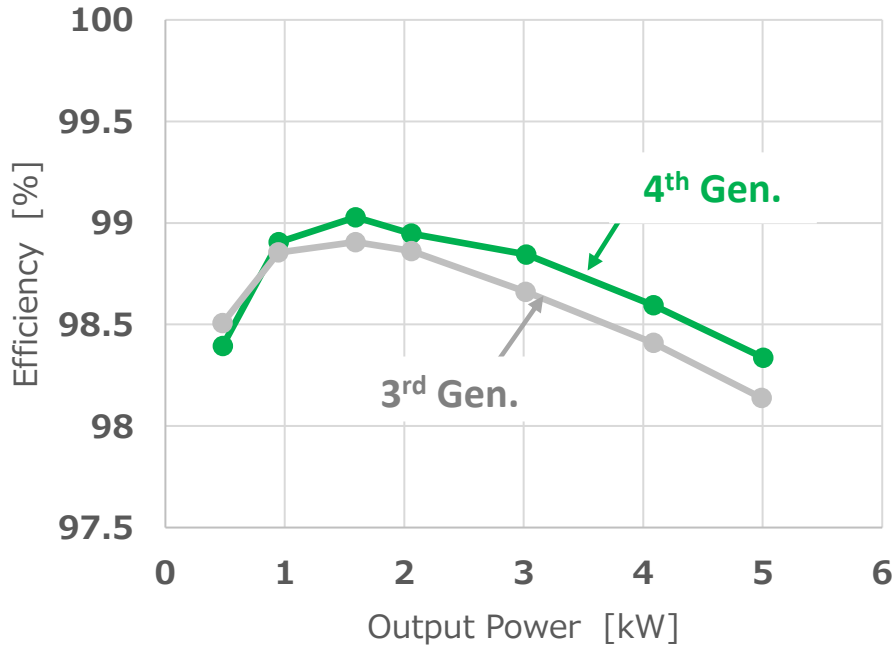


그림 3.  $P_{out}$ 을 지표로 한 효율

제4세대 SiC MOSFET를 사용한 경우, 대부분 모든 부하 범위에서 효율이 개선되었으며, 5kW일 때 제3세대 SiC MOSFET에 비해 손실이 10.13W 삭감되었습니다. 그리고, 이러한 손실 저감에 따라 효율이 0.20% 개선되었습니다. 또한, 최고 효율도 98.91%에서 99.03%로 0.12% 개선되어 99%를 넘는 효율을 실현하였습니다.

다음으로 손실에 대해 설명하겠습니다.

### 손실 분석

그림 4의 원그래프는  $P_{out} = 5kW$  동작 시의 인버터 총 손실 전력 ( $P_{total}$ )의 내역입니다. (a)는 제3세대 SiC MOSFET를 사용한 경우이며, (b)는 제4세대 SiC MOSFET를 사용한 경우입니다. 손실 내역은 MOSFET의 도통 손실과 스위칭 손실, Upper arm / Lower arm의 데드 타임 구간에서의 Body Di 도통 손실, 리액터의 동손과 코어 손실, 입출력 콘덴서의 ESR 손실 등입니다.

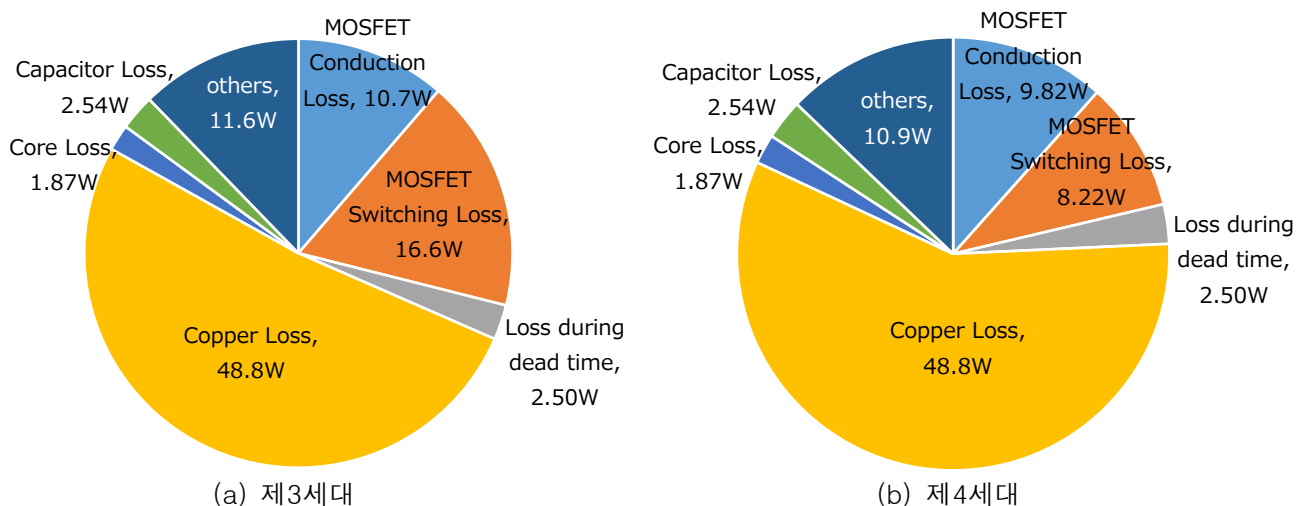


그림 4. 5kW일 때의  $P_{total}$  분석

MOSFET의 특성은 온도에 따라 변화합니다. 본 손실 분석 계산의 경우, 냉각 팬을 통한 충분한 냉각 조건이 있어 온도 상승이 50°C 정도이므로, 약 50°C 상승 시의 ON 저항 ( $R_{ON}$ )을 기본으로 합니다.

### 1) MOSFET의 도통 손실

제4세대 SiC MOSFET의  $R_{DS(ON)}$ 은 상승 온도 50°C에서 약 32mΩ이며, 1개의 MOSFET에 흐르는 실효 전류는 12.5Arms입니다. Upper arm MOSFET ( $Q_{H1}$  및  $Q_{H2}$ )와 Lower arm MOSFET ( $Q_{L1}$  및  $Q_{L2}$ )는 동기정류 모드로 동작합니다. 그리고, Upper arm 또는 Lower arm MOSFET는 220ns의 데드 타임 (DT) 구간을 제외하고 어느 한쪽이 ON 상태를 유지합니다. MOSFET의 1주기는 25μs이므로, PWM부의 MOSFET 도통 손실은  $(12.5Arms)^2 \cdot 32m\Omega \cdot (1 - (220ns \cdot 2) / 25\mu s) \cdot 2pcs = 9.82W$ 가 됩니다.

마찬가지로 제3세대 SiC MOSFET를 계산하면,  $R_{DS(ON)}$ 은 약 35mΩ이므로 10.7W가 됩니다.

### 2) MOSFET의 스위칭 손실

그림 5와 그림 6은, PWM부에서 사용되는 제4세대 SiC MOSFET (SCT4026DE)의  $R_G$ - $E_{sw}$ ,  $R_G$ - $dV/dt$ ,  $R_G$ - $dI/dt$  특성을 나타낸 것입니다. 그림 5는 가로축이 드레인 전류  $I_D$ , 그림 6은 가로축이 외장 게이트 저항  $R_G$ 입니다. 이러한 특성은 일반적으로 잘 알려져 있는 더블 펄스 시험으로 측정하였습니다.

$R_G$ 가 작을수록 스위칭 속도는 빨라지고,  $E_{sw}$ 은 작아지고,  $dV/dt$  및  $dI/dt$ 는 커집니다. 본 평가에서 사용한 TO-247N 패키지는  $dI/dt$ 가 커지면 게이트 용량으로의 총방전 전류를 억제하는 소스 단자의 기생 인덕턴스로 인한 기전이 커지게 됩니다. 따라서,  $R_G$ 가 4.7Ω 이하인 경우, 스위칭 손실에 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있습니다. 그림,  $R_G$ 가 4.7Ω일 때의  $E_{on}$ ,  $E_{off}$ 를 사용하여 총 스위칭 손실을 계산해 보겠습니다.

MOSFET의 스위칭 손실 에너지 ( $E_{sw}$ )는 주로 turn-on 손실 에너지 ( $E_{on}$ ), turn-off 손실 에너지 ( $E_{off}$ ), 그리고 역회복 손실 에너지 ( $E_{rr}$ )로 구성됩니다.

위상각  $\theta$  지점에서 1개의 MOSFET에 흐르는 평균 전류는 식 (1)과 같으므로, PWM부의 MOSFET 평균  $P_{sw}$ 은 구간 전체에서의  $E_{total\_sw} \cdot f_{sw}$ 의 적분치이며, 이 적분을 평균화하는 식 (2)로 구할 수 있습니다.

$$I = \sqrt{2} \cdot 12.5 \cdot \sin \theta \quad (A) \quad (1)$$

$$P_{sw} = \frac{1}{T} \int_0^T E_{total\_sw} f_{sw} dt \cdot 4pcs = 8.22 W \quad (2)$$

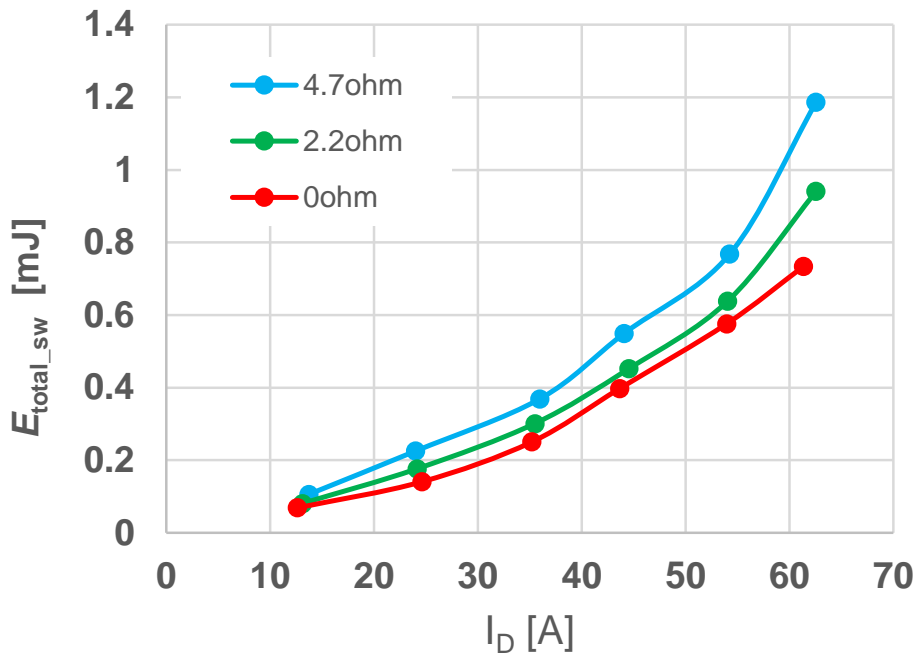


그림 5.  $I_D$ 를 가로축으로 한 SCT4026DE의 스위칭 특성

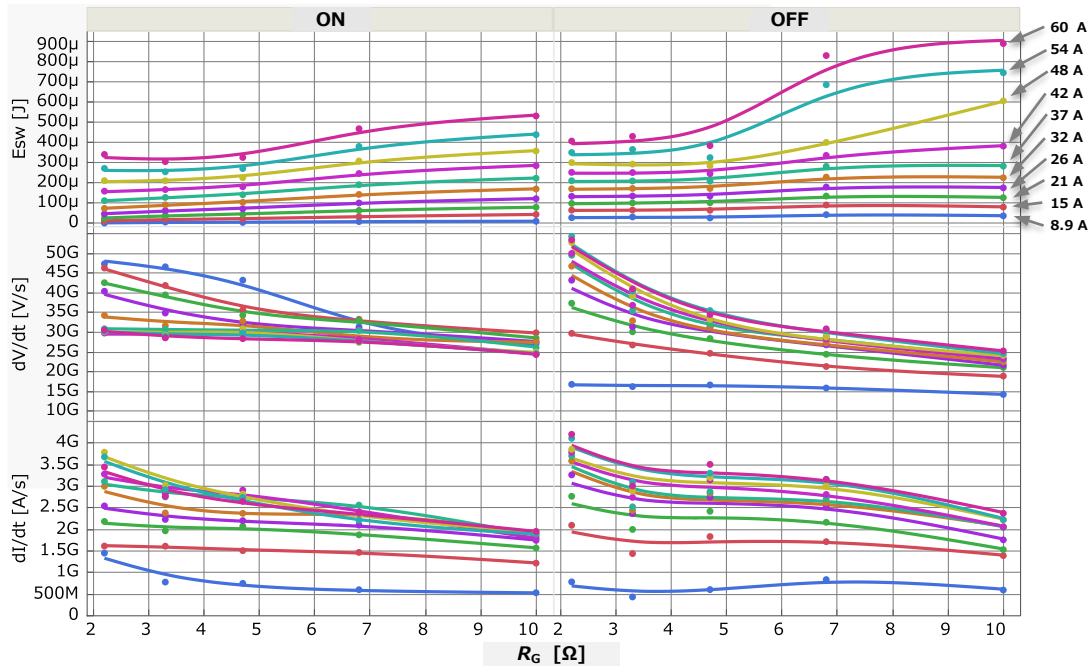


그림 6. R<sub>G</sub>를 가로축으로 한 SCT4026DE의 스위칭 특성

### 3) DT 구간에서의 전력 손실

본 평가의 인버터는 DT가 220ns로 설정되어 있으며, 해당 구간동안 전류는 MOSFET의 Body Di에 흐릅니다. Body Di에 흐르는 평균 전류도 식 (1)과 같이 나타낼 수 있습니다. P<sub>sw</sub>과 마찬가지로 DT 구간 중 손실 전력 P<sub>DT</sub>는 다음 식으로 계산할 수 있습니다.

$$P_{DT} = \frac{1}{T} \int_0^T |V_{DS}| \cdot |I_D| \cdot f_{sw} \cdot 2DT dt \cdot 2pcs. \quad (3)$$

V<sub>DS</sub>와 I<sub>D</sub>는 각각 MOSFET의 소스 - 드레인 간의 전압과 전류입니다. MOSFET의 제3상한 (象限) V-I 특성을 바탕으로 계산하면, P<sub>DT</sub> = 1.25W \* 2pcs = 2.50W가 됩니다.

### 4) 동손

리액터는 4직렬 구성입니다. 20kHz 동작이므로 리액터 1개의 여자 (Excitation / 勵磁) 인덕턴스를 300 μH 이상으로 설계하였으며, turn 수는 40turn 이상입니다. 따라서 1개의 리액터에서 권선의 동선 저항치는 19.53mΩ이 되어, 실효 전류 25Arms의 총 동손은 (25Arms)<sup>2</sup>\*19.53mΩ = 12.21W가 되고, 4직렬이므로 12.21W\*4=48.84W가 됩니다. 이 손실은 기본적으로 캐리어 주파수에 의존하지 않습니다.

### 5) 철손

리액터의 코어 손실은 식 (4)로 구해지는 리액터의 리플 전류 Δi<sub>L</sub>의 최대치로부터 구할 수 있습니다. 리액터는 일정한 직류 중첩 특성을 지니고 있어 전류치와 듀티 비율 d에 따라 변화하고, d가 0.5일 때 최대치가 되어 Δi<sub>L</sub> = 2.58A가 됩니다.

$$\Delta i_L = \frac{d(1-d)V_{in}T}{L} \quad (4)$$

사용한 코어 재료 (FeNi계 High Flux 코어)의 코어 손실 특성을 바탕으로, 코어 손실을 1.87W로 산출하였습니다.

### 6) 콘덴서의 등가 직렬 저항 (ESR) 손실

입출력 콘덴서에 흐르는 리플 전류는 콘덴서의 등가 직렬 저항 (ESR)으로 인해 손실을 발생시킵니다. 출력 콘덴서의 리플 전류는 리액터 Δi<sub>L</sub>과 같아집니다. 반면에, 입력 콘덴서의 리플 전류 i<sub>Cin</sub>은 식 (5)로 계산할 수 있습니다.

$$i_{Cin} = \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}} i_{OUT}^2 \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}}\right) + \frac{1}{12} \Delta i_L^2} \quad (5)$$

이러한 계산식을 사용하여 계산하면, 입출력 콘덴서의 손실은 2.54W가 되며, 대부분 입력 콘덴서의 손실에 해당됩니다.

5) 기타

상기 이외의 손실 전력은 제3세대 약 11.6W, 제4세대 약 10.9W이며, 회로 기판 상 배선 부품의 도통 손실 등이 포함되어 있습니다. 제4세대가 약 0.7W 감소한 것은, 스위칭 속도의 고속화 요인 중 하나인 MOSFET 구동 전력에 차이가 있기 때문이라고 할 수 있습니다.

그림 7은 5kW의 손실 내역 비교입니다. 트랜지스터의 손실 차이가, 손실 전체의 차이에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있습니다. 스위칭 주파수를 2배 이상으로 높여도, Si IGBT를 제3세대 SiC MOSFET로 대체하는 하는 것만으로 37W (28%)나 저감되고, 제4세대 SiC MOSFET의 경우 추가로 10W (11%) 저감됩니다. 제3세대와 제4세대를 비교하면, 스위칭 손실의 저감이 전체의 손실 차이가 되는 것을 알 수 있습니다.

각 스위칭 디바이스를 사용한 인버터 회로의 성능을 표 2로 정리하였습니다. 본 예에서는 동일한 플랫폼에서 평가하였으므로, 사이즈 면에서의 메리트는 비교할 수 없었습니다. 그러나, 스위칭 주파수의 고주파화에 관계없이, 제4세대 SiC MOSFET를 통해 36%의 손실 삭감을 달성하여, 냉각 구조의 간략화 및 리액터의 소형화 등 대폭적인 성능 개선을 기대할 수 있다는 점은 명백하게 알 수 있었습니다.

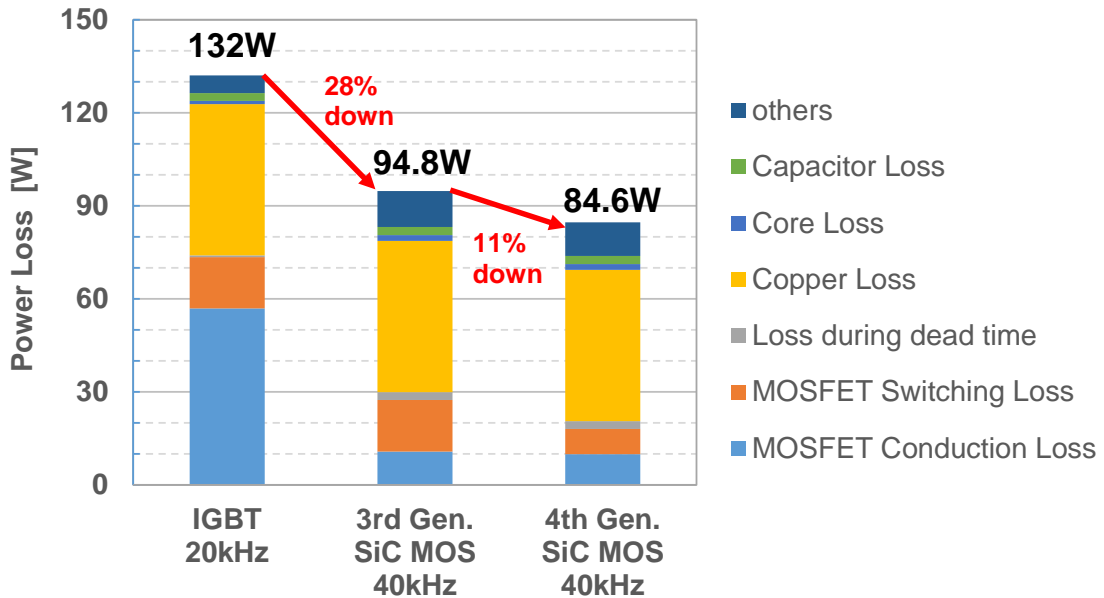


그림 7. 5kW일 때의 각 인버터 P<sub>total</sub> 내역 비교

표 2. 각 인버터 회로의 성능 비교

	IGBT	제3세대 SiC MOSFET	제4세대 SiC MOSFET
Switching transistors	STGW60H65DFB 650V, 60A	SCT3030AL 650V, 30mΩ	SCT4026DE 750V, 26mΩ
Switching frequency	20 kHz	40 kHz	40 kHz
Conversion efficiency (@5kW)	97.43%	98.14%	98.33%
Total loss (@5kW)	132W	94.8W	84.6W

## 정리

Full-bridge 방식의 인버터 회로에 SiC MOSFET를 스위칭 디바이스로서 사용함으로써, Si IGBT에 비해 높은 스위칭 동작임에도 불구하고, 변환 효율을 대폭 높일 수 있습니다. 또한, 제3세대에서 제4세대 SiC MOSFET로 대체함으로써, 스위칭 특성을 대폭 개선하여, 한층 더 효율을 향상시킬 수 있습니다.

제4세대 SiC MOSFET는 모든 전원 시스템의 소형화 및 저전력화에 크게 기여할 수 있습니다.

## 참고 자료 :

\*1 : 5kW 고효율 Fan-less 인버터 회로

어플리케이션 노트 (No. 64AN087K Rev.001), ROHM Co., Ltd. October 2021

## Notes

- 1) The information contained herein is subject to change without notice.
- 2) Before you use our Products, please contact our sales representative and verify the latest specifications :
- 3) Although ROHM is continuously working to improve product reliability and quality, semiconductors can break down and malfunction due to various factors.  
Therefore, in order to prevent personal injury or fire arising from failure, please take safety measures such as complying with the derating characteristics, implementing redundant and fire prevention designs, and utilizing backups and fail-safe procedures. ROHM shall have no responsibility for any damages arising out of the use of our Products beyond the rating specified by ROHM.
- 4) Examples of application circuits, circuit constants and any other information contained herein are provided only to illustrate the standard usage and operations of the Products. The peripheral conditions must be taken into account when designing circuits for mass production.
- 5) The technical information specified herein is intended only to show the typical functions of and examples of application circuits for the Products. ROHM does not grant you, explicitly or implicitly, any license to use or exercise intellectual property or other rights held by ROHM or any other parties. ROHM shall have no responsibility whatsoever for any dispute arising out of the use of such technical information.
- 6) The Products specified in this document are not designed to be radiation tolerant.
- 7) For use of our Products in applications requiring a high degree of reliability (as exemplified below), please contact and consult with a ROHM representative : transportation equipment (i.e. cars, ships, trains), primary communication equipment, traffic lights, fire/crime prevention, safety equipment, medical systems, servers, solar cells, and power transmission systems.
- 8) Do not use our Products in applications requiring extremely high reliability, such as aerospace equipment, nuclear power control systems, and submarine repeaters.
- 9) ROHM shall have no responsibility for any damages or injury arising from non-compliance with the recommended usage conditions and specifications contained herein.
- 10) ROHM has used reasonable care to ensure the accuracy of the information contained in this document. However, ROHM does not warrants that such information is error-free, and ROHM shall have no responsibility for any damages arising from any inaccuracy or misprint of such information.
- 11) Please use the Products in accordance with any applicable environmental laws and regulations, such as the RoHS Directive. For more details, including RoHS compatibility, please contact a ROHM sales office. ROHM shall have no responsibility for any damages or losses resulting non-compliance with any applicable laws or regulations.
- 12) When providing our Products and technologies contained in this document to other countries, you must abide by the procedures and provisions stipulated in all applicable export laws and regulations, including without limitation the US Export Administration Regulations and the Foreign Exchange and Foreign Trade Act.
- 13) This document, in part or in whole, may not be reprinted or reproduced without prior consent of ROHM.



Thank you for your accessing to ROHM product informations.  
More detail product informations and catalogs are available, please contact us.

## ROHM Customer Support System

<https://www.rohm.co.kr/contactus/>