

특집 : SiC 전력반도체 소자의 기술동향

# 고효율 파워소자를 이용한 3kW PV-PCS의 Boost Converter 효율 개선

김재형\*, 원충연\*\*, 이태원\*\*\*  
(성균관대 \*박사과정, \*\*교수, \*\*\*삼성전기(주) 책임)

최근 화석에너지 고갈과 환경오염, 에너지 저감정책에 따라 전기기기의 고효율화와 신재생에너지가 주목받고 있다. 고효율을 얻기 위해서는 고효율의 파워소자를 사용하는 방법과 토폴로지를 개선하는 방법이 있다. 본 논문에서는 일반 파워소자와 고효율 파워소자의 효율을 3kW급 가정용 태양광 인버터(PV-PCS)의 Boost Converter부의 입력사양에 맞춰 시험하고, 효율 개선의 정도를 비교 확인하였다.

## 1. 서론

최근 주목을 받는 고효율의 파워소자 중에 SiC-SBD (Schottky Barrier Diode)와 CoolMOS가 있다.

SiC-SBD는 역회복 전류가 거의 없으므로 고속 스위칭시 스위칭 손실이 증가하지 않는다. CoolMOS의 경우 RDS(ON)이 기존의 MOSFET에 비해 현저히 낮아 도통손실을 크게 낮출 수 있다.

최근 3kW급 가정용 태양광 인버터는 95% 대에 최대효율을 가지는 제품들이 출시되고 있다. PV-PCS는 크게 Boost Converter부와 Inverter부로 나뉘지게 되는데 95% 이상의 효율을 얻으려면 각 부위의 효율이 97.5% 이상이 되어야 한다. 본 논문에서는 Boost Converter를 3kW 태양광 인버터

사양에 맞추어 설계를 하고 일반 파워소자와 고효율 파워소자를 적용하여 손실계산을 한 후, 실제로 장착하여 시험하고 고효율 파워소자의 경우 일반 파워소자에 비해 얼마나 효율이 개선되는지 비교해 본다.

## 2. 고효율 파워소자

### 2.1 SiC-SBD(Schottky Barrier Diode) 특징<sup>(1)</sup>

2001년 2월 Infineon Technologies사에서 상용화한 SiC-SBD는 Si-SBD와 비교하여 다음과 같은 장점이 있다.

- ① 쇼트키 장벽이 2배 높고, 누설전류가 작다.
- ② 절연파괴전계가 10배 높고, ON 저항이 작다.
- ③ 열전도율이 3.3배 우수하여 동작 상한온도가 높다.
- ④ 온도에 정(靜)특성이 있어 병렬운전이 가능하다.
- ⑤ 역회복 전류가 거의 없어 고속 스위칭시 스위칭 손실이 증가하지 않는다.

반면에 아래와 같은 단점이 있다.

- ① 침투치 서지 전류 허용값이 작으므로 설계시 대책이 필요하다.
- ② 가격이 고가이다.

### 2.2 CoolMOS의 특징<sup>(2)</sup>

1998년 독일의 SIMENS사에서 처음 발표하였다.  
 기존의 MOSFET와 비교하여 다음과 같은 장점이 있다.  
 ① RDS(ON)이 기존의 MOSFET의 1/5 수준이다.  
 ② 칩 사이즈가 작다.

반면에 아래와 같은 단점이 있다.

① 가격이 다소 비싸다.

### 3. 손실전력계산 및 효율측정 실험<sup>(3)(4)</sup>

본 실험에서는 MOSFET, Fast Recovery Diode로 구성된 Set A와 CoolMOS, SiC Diode로 구성된 Set B를 이용하여 3kW Boost Converter를 제작하고 입력 전압과 부하별로 효율을 측정하였다.

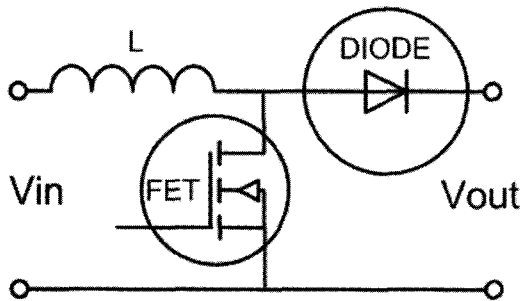


그림 1 Boost Converter

#### 3.1 Boost Converter 사양

아래 표 1은 Boost Converter의 사양을 나타낸다.

표 1 Boost Converter 사양

Boost Converter	Symbol	Value	Unit
정격 용량	P	3000.00	[W]
입력 전압 (최대)	V <sub>IN_MAX</sub>	350.00	[V]
입력 전압 (최소)	V <sub>IN_MIN</sub>	200.00	[V]
입력 전류 (최대)	I <sub>IN_MAX</sub>	15.00	[A]
입력 전류 (최소)	I <sub>IN_MIN</sub>	8.57	[A]
출력 전압	V <sub>OUT</sub>	400.00	[V]
인덕터	L	2	[mH]
스위칭 주파수	F <sub>SW</sub>	15	[kHz]

각 실험 Set 별로 사용된 FET 소자의 기본 사양을 비교하여 보면 아래 표 2와 같다.

표 2 FET의 사양 비교

FET	Symbol	Set A	Set B	Unit
		2SK2879-01 (MOSFET)	IPW60R045CS (CoolMOS)	
드레인-소스전압	V <sub>DS</sub>	500	600	[V]
드레인 전류	I <sub>D</sub>	20	60	[A]
허용손실	P <sub>D</sub>	150	431	[W]
에벌런치 에너지 [단발]	E <sub>AR</sub>	761	1950	[mJ]
드레인-소스저항	R <sub>DS(ON)</sub>	0.38	0.045	[Ω]
게이트 전하량	Q <sub>C</sub>	150	150	[nC]

아래 표는 각 실험 Set 별로 사용된 Boost Diode의 기본 사양을 비교하여 보면 아래 표 3과 같다.

표 3 Diode의 사양 비교

Diode	Symbol	Set A	Set B	Unit
		30EFP06PbF (FR-Diode)	IDT16S60C (SiC-Diode)	
역전압	V <sub>RRM</sub>	600	600	[V]
정방향 연속전류	I <sub>F</sub>	30	16	[A]
정방향 전압강하	V <sub>F</sub>	1.2	1.7	[V]
역회복시간	t <sub>rr</sub>	60	0	[nS]

#### 3.2 손실계산

손실계산을 위해 입력 전압을 300[V], 출력 전압을 400[V], 부하량 100[%]의 조건에서 계산하였다.

##### 3.2.1 FET 손실전력 계산

FET의 손실전력( $P_{FET}$ )은 스위칭손실( $P_{SW}$ ), 도통 손실( $P_{COND\_FET}$ ), FET 출력 커패시턴스 충전 손실( $P_{COSS}$ )의 합으로 표현된다.

$$P_{FET} = P_{SW} + P_{COND\_FET} + P_{COSS} \quad (1)$$

스위칭손실( $P_{SW}$ )은 ON, OFF시 Drain-Source간 전압

( $V_{DS}$ )와 FET를 통하여 흐르는 Drain 전류( $I_D$ )가 겹치는 면적으로 나타나게 되는데 ON시 스위칭손실( $E_{ON}$ )과 OFF시 스위칭손실( $E_{OFF}$ )로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{SW} = (E_{ON} + E_{OFF}) \times F_{SW} \quad (2)$$

$$E_{ON} = \int_{t_{off}}^{t_{on}} I_D(t) \times V_{DS}(t) dt \quad (3)$$

$$E_{OFF} = \int_{t_{on}}^{t_{off}} I_D(t) \times V_{DS}(t) dt \quad (4)$$

$$t_{on} = t_{d(on)} + t_r \quad (5)$$

$$t_{off} = t_{d(off)} + t_f \quad (6)$$

FET의 도통 손실( $P_{COND\_FET}$ )은 다음과 같다.

$$P_{COND\_FET} = I_{IN_{rms}}^2 \times R_{DS(ON)} \times D_{ON} \quad (7)$$

FET의 출력커패시턴스( $C_{OSS}$ )에 충전되는 전력( $P_{COSS}$ )은 다음과 같다.

$$P_{COSS} = \frac{C_{OSS} \times V_{IN}^2 \times F_{SW}}{2} \quad (8)$$

그러므로 Set별 FET의 손실전력( $P_{FET}$ )의 계산 결과는 아래 표 4와 같다.

표 4 FET의 손실전력 계산

FET 손실전력	Set A	Set B	Unit
	2SK2879-01 (MOSFET)	IPW60R045CS (CoolMOS)	
$P_{SW}$	28.350	7.200	{W}
$P_{COND\_FET}$	10.260	1.215	{W}
$P_{COSS}$	0.234	0.145	{W}
$P_{FET}$	38.844	8.560	{W}

### 3.2.2 Boost Diode 손실전력 계산

Diode의 손실전력( $P_{DIODE}$ )은 역회복 손실( $P_{rr}$ )과 도통 손실( $P_{COND\_DIODE}$ )로 구성된다.

$$P_{DIODE} = P_{rr} + P_{COND\_DIODE} \quad (9)$$

정방향 최대전류( $I_{FM}$ )는 다음과 같다.

$$I_{FM} = \frac{P}{V_{IN}} \quad (10)$$

역회복 최대전류( $I_{RRM}$ )는 다음과 같다.

$$I_{RRM} = I_{FM} \times \frac{I_R}{I_F} = \frac{I_{FM}}{S} \quad (11)$$

여기서 역회복시 정방향 전류( $I_F$ ), 역방향 전류( $I_R$ ), Snap factor(S)는 Datasheet를 참조한다.

역회복 손실( $P_{rr}$ )은 Diode 역전압( $V_R$ ), 역회복 최대전류( $I_{RRM}$ ), 역회복 시간( $t_{rr}$ ), 스위칭 주파수( $F_{SW}$ )로 아래와 같이 나타낸다.

$$P_{rr} = \frac{V_R \times I_{RRM}}{2} \times t_{rr} \times F_{SW} \quad (12)$$

SiC Diode의 경우 역회복 시간( $t_{rr}$ )이 없기 때문에 전체 커패시터 충전량( $Q_C$ )를 이용하여 역회복 손실( $P_{rr}$ )을 구한다.

$$P_{rr} = V_R \times Q_C \times F_{SW} \quad (13)$$

Diode의 도통 손실( $P_{COND\_DIODE}$ )은 Diode 내부 등가저항 손실( $P_{RD}$ )과 정방향 전압강하 손실( $P_{VF}$ )로 구성된다.

$$P_{COND\_DIODE} = P_{Rd} + P_{Vf} \quad (14)$$

Diode 내부 등가저항의 손실( $P_{RD}$ )은 Diode 내부 등가저항( $R_D$ )과 Diode에 흐르는 실효전류( $I_{rms}$ )의 곱으로 표현된다.

$$P_{RD} = R_D \times I_{rms}^2 \quad (15)$$

Diode 내부 등가저항( $R_D$ )은 Datasheet에 나와 있는 정방향 전압강하( $V_F$ )-정방향 전류( $I_F$ )의 특성곡선의 기울기로 얻을 수 있다.

정방향 전압강하 손실( $P_{VF}$ )는 정방향 전압강하( $V_F$ ), 실효 전류( $I_{rms}$ ), 듀티비( $D_{ON}$ )로 구성된다.

$$P_{VF} = V_F \times I_{rms} \times (1 - D_{ON}) \quad (16)$$

그러므로 Diode의 손실전력( $P_{DIODE}$ )은 표 5와 같다.

표 5 Boost Diode의 손실전력 계산

Boost Diode 손실전력	Set A	Set B	Unit
	30EFP06PbF (FR-Diode)	IDT16S60C (SiC-Diode)	
$P_{tr}$	3.600	0.228	[W]
$P_{RD}$	0.900	2.880	[W]
$P_{VF}$	6.364	9.016	[W]
$P_{DIODE}$	10.860	12.120	[W]

SiC Diode의 경우 역회복 구간이 거의 없으므로 Fast Recovery Diode에 비해 역회복 손실이 현저히 작다. 그러므로 스위칭 주파수가 높을수록 더 높은 효율향상을 기대할 수 있다. 그러나 본 실험에 사용된 FR-Diode 보다 다소 높은 내부 등가저항( $R_D$ )과 정방향 전압강하( $V_F$ ) 때문에 도통 손실( $P_{COND\_DIODE}$ )이 크다.

### 3.3 효율측정 및 비교

SMPS로 200VDC~350VDC의 전원을 공급하고 전자부하를 이용하여 5%~100%의 부하를 변화시켰다. 효율측정 장비는 YOKOGAWA 사의 WT3000(Precision Power Analyzer)을 사용하였다.

아래 표 6은 입력전압 300VDC 출력전압 400V<sub>DC</sub>, 부하량 100%에서의 계산효율을 실측효율과 비교한 것이다. 계산효율( $Eff_{cal1}$ )에는 프리트기판 도통 손실, Boost Inductor 손실, Connector 손실, 계측기 오차 등이 빠져 있다. 그러므로 Set B의 실측효율에 맞춰 보정계수( $K$ )를 설정하고 Set A,B에 동일하게 보정계수를 곱하여 보정계산효율( $Eff_{cal2}$ )을 실측효율( $Eff_{ex}$ )과 비교하면 0.2[%]의 오차가 있지만 거의 근접한 보정계산효율을 얻을 수 있다.

표 6 계산효율과 실측효율 비교

	Symbol	Set A	Set B	Unit
FET 손실	$P_{FET}$	38.844	8.560	[W]
Boost Diode 손실	$P_{DIODE}$	10.860	12.120	[W]
계산효율	$Eff_{cal1}$	98.343	99.311	[%]
보정계수	$K$	0.993	0.993	
보정계산효율( $Eff_{cal1} \times K$ )	$Eff_{cal2}$	97.699	98.660	[%]
실측효율	$Eff_{ex}$	97.900	98.660	[%]

아래 그림 2,3에서는 Set A,B의 실측효율을 나타낸다.

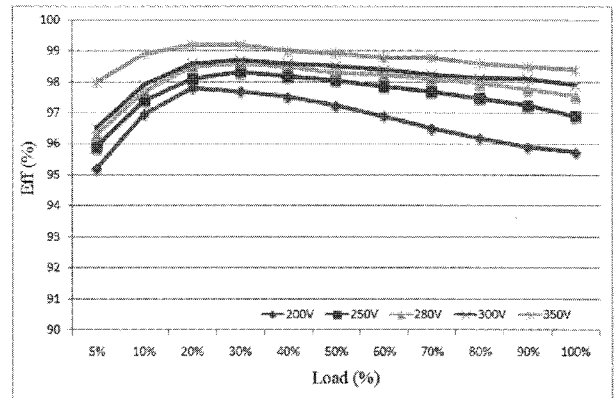


그림 2 Set A의 실측효율

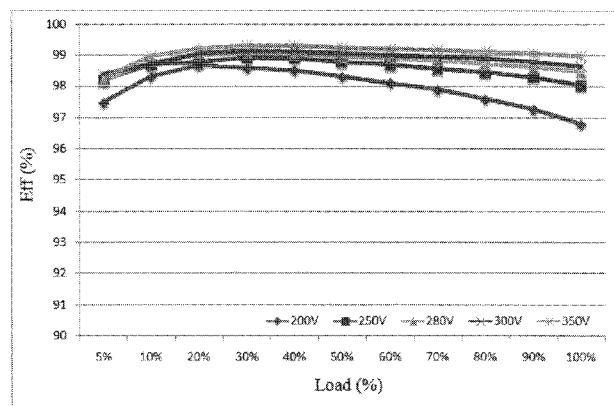


그림 3 Set B의 실측효율

일반소자를 사용한 Set A(그림 2) 보다 고효율 소자를 사용한 Set B(그림 3)가 전체 입력전압과 전체 부하영역에서 평균 0.84% 이상의 효율이 향상됨을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 고효율 파워소자인 SiC Diode와 CoolMOS의 성능을 평가하기 위해 3kW PV-PCS의 Boost Converter 사양을 토대로 일반 파워소자의 경우와 고효율 파워소자의 경우를 비교하여 손실계산과 효율측정실험을 진행하였다. 손실계산결과 SiC Diode의 경우 역회복 손실이 현저히 낮으므로 스위칭 주파수가 높을수록 유리함을 알 수 있다. CoolMOS의 경우 스위칭 손실이 일반소자에 비해 4배정도 작았고, 도통손실도 1.6배 정도 낮다. 입력전압과 부하량에 따라 고효율소자의 경우 전체적으로 평균 0.84%이상 효율이 향상된다. 입력전압 200V<sub>DC</sub>를 제외하고 전 영역에서 98% 이상의 효율을 얻었다. 그러므로 대량으로 고효율 파워소자를

구매하여 가격을 낮출 수 있다면 PV-PCS에 적용이 가능할 것으로 생각 된다. ■

이 논문은 삼성전기(주)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고문헌

- [1] Infineon Technologies AG, "WhitePaper\_SiC." [Online]. Available: <http://www.infineon.com/>
- [2] Infineon Technologies AG, "AN\_CoolMOS\_01\_Rev1.2." [Online]. Available: <http://www.infineon.com/>
- [3] Infineon Technologies AG, "ICE1PCS01/02." [Online]. Available: <http://www.infineon.com/>
- [4] "고효율 파워소자 SiC와 CoolMOS," 월간전자기술 6월, pp. 89-97, 2005.

## 〈필자소개〉



### 김재형(金宰亨)

1975년 12월 3일생. 2000년 동의대 공과대학 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 성균관대학교 전력전자연구소 태양광시스템 대학원 박사과정.



### 원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988년~현재 한국 철도기술연구원 심사위원. 2006년~현재 한국전력공사 PQ심사위원. 2006년~현재 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2007년~현재 도시철도기술실무위원회 위원(건설교통부). 2007년~현재 월간 전기설비 편집자문위원. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수. 2007년~2008년 당 학회 부회장.



### 이태원(李泰遠)

1971년 7월 14일생. 2000년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(공박). 2007년~2008년 미국 Michigan State University Postdoctoral Research Associate. 2008년~현재 삼성전기(주) Power사업팀 책임연구원.