

단상 계통연계형 태양광 발전 시스템용 고효율 MOSFET 인버터

류형민[†]

Highly Efficient MOSFET Inverter for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Power Generation Systems

Hyung-Min Ryu[†]

Abstract - A highly efficient MOSFET inverter for single-phase grid-connected photovoltaic power generation systems is presented in this paper. It is a full-MOSFET version of the conventional transformerless full-bridge inverter with dual L-C filters using unipolar PWM. The key idea lies on smart pre switching (SPS), which can make the large switching loss due to a poor reverse recovery of the MOSFET's body diode reduced dramatically. The validity of the proposed inverter is verified by experiment.

Keywords: highly efficient, inverter, MOSFET, photovoltaic, smart pre switching (SPS)

1. 서 론

계통연계형 태양광 인버터는 변압기의 유무 및 종류에 따라 세 가지로 분류되는데, 저주파 변압기와 고주파 변압기를 사용하는 방식에 비해 변압기가 없는 방식은 효율이 높고 비용이 낮은 만큼 수익이 높다. 변압기가 없는 인버터의 유럽 시장 점유율은 80%에 달하며, 일본의 경우는 대략 50%이다. 이하 태양광 인버터는 계통연계형으로 변압기가 없는 방식을 의미한다.

단상 태양광 인버터는 가변 직류 전원인 태양 전지와 계통을 연결하기 위해 통상 두 단계의 전력 변환, 승압 DC/DC 컨버터와 단상 DC/AC 컨버터로 구성된다. 본 논문의 연구 대상은 후자이며, 이하 태양광 인버터는 별도의 언급이 없는 한 단상 DC/AC 컨버터만을 의미한다.

태양광 인버터의 기본 토폴로지는 일명 H4이다. 여기서, H는 H-bridge, 4는 능동 스위치의 개수를 의미한다. 가능한 스위칭, 즉 PWM 방식은 bipolar PWM, unipolar PWM, 그리고 single phase chopping 세 가지이며, 인덕

터를 하나 또는 둘로 나눠서 사용할 수 있으므로 H4의 가능한 조합은 총 여섯 가지이다. 이 중 공통 모드 (common mode, 이하 CM) 전압이 직류단 전압의 절반으로 일정한 bipolar PWM과 인덕터 둘의 조합만이 실제적으로 사용가능하다. 나머지 조합은 구형파의 CM 전압을 발생시키므로 태양 전지와 프레임, 즉 접지 간의 큰 기생 커패시턴스로 인한 심각한 누설 전류 문제를 초래한다^{[1]-[3]}. 참고로, 600V/30A급 IGBT와 방열판 간의 기생 커패시턴스는 수십 pF에 불과한데 반해, 200~350V/3kW급 태양 전지와 프레임 간의 기생 커패시턴스는 수십 nF에 달한다.

하지만 bipolar PWM 방식은 unipolar PWM 방식에 비해 동일한 최대 리플 전류 조건에서 스위칭 손실과 인덕턴스의 곱이 네 배가 되므로 변압기를 제거한 이점이 크게 희석된다. 따라서 효율 향상 및 비용 절감을 위한 개선안으로 일명 고효율 태양광 인버터들이 제안되었고, Sunways사의 HERIC을 비롯한 수십 개의 H4, H5, H6 토폴로지가 상용화되었다^{[2]-[8]}. 이들의 기술적 목적은 누설 전류의 문제 없이 unipolar PWM의 효과를 얻는 것이다. 각각의 토폴로지에는 다 일장일단이 있어 효율과 비용을 고려한 수익은 대동소이하다.

본 논문은 고효율 태양광 인버터의 효율을 더욱 개선하기 위한 일명 초고효율 태양광 인버터를 제안한다. 제안된 방식은 에어컨 압축기용 고효율 인버터를 소개한 참고 문헌 [9]의 SPS (smart pre switching) 기술을 활용한다.

Paper number: TKPE-2014-19-3-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hmryu@deu.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Dong-Eui University

Tel: +82-51-890-1670 Fax: +82-51-890-1664

Manuscript received Sep. 12, 2013; accepted Feb. 25, 2014

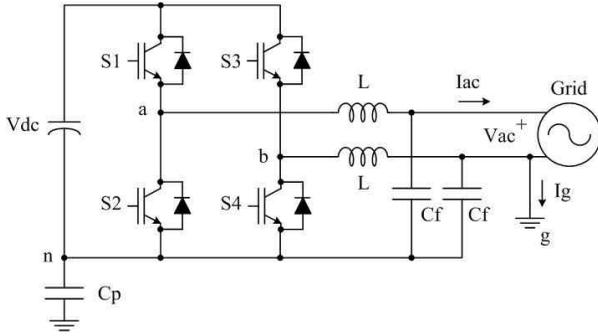


Fig. 1 H4 inverter with dual filter capacitors

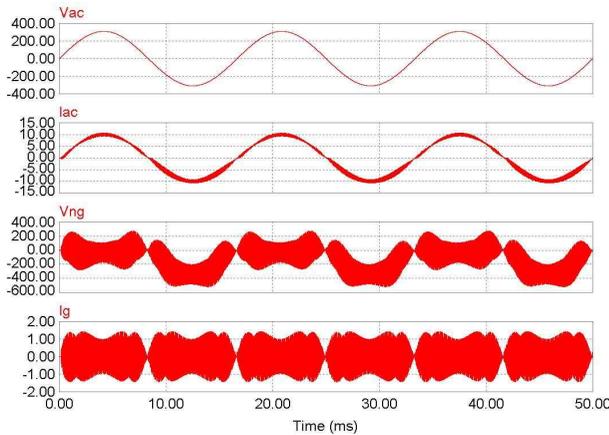


Fig. 2 Simulation result without filter capacitors

참고문헌 [9]의 아이디어를 요약하면 다음과 같다. 기존의 3상 IGBT 인버터에서 아래쪽 스위칭 소자를 모두 MOSFET으로 대체하고 각 MOSFET을 120도씩 통전시키는 discontinuous PWM을 사용하여, 저전류에서 IGBT와 FRD보다 전도 손실이 적은 MOSFET의 장점을 극대화한다. 하지만 MOSFET body diode의 큰 역회복 전류에 의해 스위칭 손실이 크게 증가하는데, 이를 MOSFET에 병렬로 SPS 회로를 추가하여 해결한다. 에어컨이 대부분 경부하에서 운전된다는 사실을 감안하면 상당한 에너지 절약 효과를 기대할 수 있다.

본 논문은 고효율 태양광 인버터가 단위 역률로 운전되고 asymmetric unipolar PWM을 사용한다는 점에 착안하여 IGBT와 FRD를 모두 MOSFET으로 대체함으로써 전도 손실뿐만 아니라 스위칭 손실까지 저감할 수 있는 방식을 제안한다. 또한 참고문헌 [9]에서는 SPS 기술에 대한 기본 개념만을 간략히 소개하고 있는데, 본 논문에서 실제 구현에 필요한 구체적인 기술 정보와 분석 결과를 제공한다. 제안된 방식의 효율 개선과 안정된 동작은 3kW급 시작품의 실험 결과를 통해 증명된다.

2. 기존의 방식

Table 1 Simulation parameters of 3kW photovoltaic inverter

Parameter	Value	Unit
DC-link voltage	380	V
Grid voltage	220	V _{rms}
Grid frequency	60	Hz
Inductance	2	mH
Filter capacitance(Cf)	1	μF
Parasitic capacitance(Cp)	50	nF
Switching frequency	16	kHz

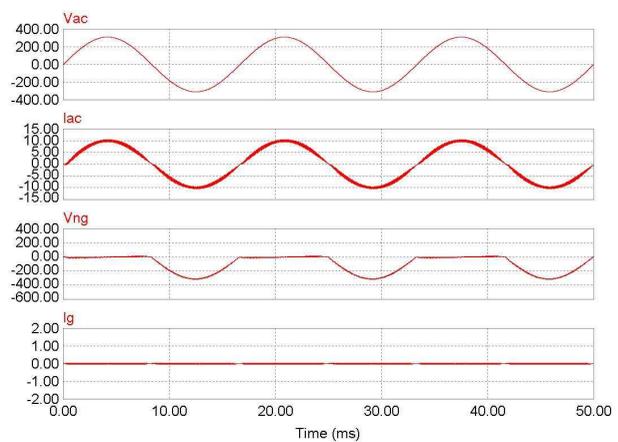


Fig. 3 Simulation result with filter capacitors

그림 1은 기존의 H4 고효율 태양광 인버터를 나타낸다. 여기서, Cp는 태양 전지와 접지 간의 기생 커패시터를 의미한다. H4 기본 토폴로지와 비교할 때 직류단 음극과 계통 측을 두 개의 필터 커패시터로 연결한 것이 유일한 차이점인데, 이 단순한 차이가 누설 전류 문제가 없는 unipolar PWM을 가능케 한다.

그림 2와 그림 3은 각각 필터 커패시터가 없을 때와 있을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션 도구는 PSIM이고 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 스위칭 방식은 asymmetric unipolar PWM으로 인버터 출력 전압이 양(음)이면 S4(S2)는 계속 켜고 S1(S3)은 스위칭한다.

필터 커패시터가 없다면(그림 2), n-g간 전압에 수백 V 크기의 고주파 리플이 발생하고, 따라서 누설 전류가 무려 738mArms에 달한다. 반면에 필터 커패시터를 추가하면(그림 3), n-g간 전압에 고주파 리플이 현저히 줄고 누설 전류가 17mArms로 감소한다.

이러한 누설 전류의 감소는 그림 4의 CM 등가 회로에서 필터 커패시터가 제공하는 낮은 임피던스가 n-g간 전압을 감소시킨다는 사실에 기인한다. CM 전압에 대한 누설 전류의 크기를 보드 선도로 그리면 그림 5와 같다.

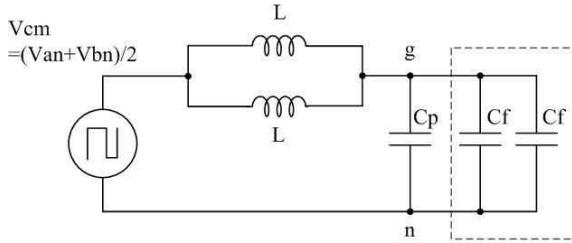


Fig. 4 CM equivalent circuit

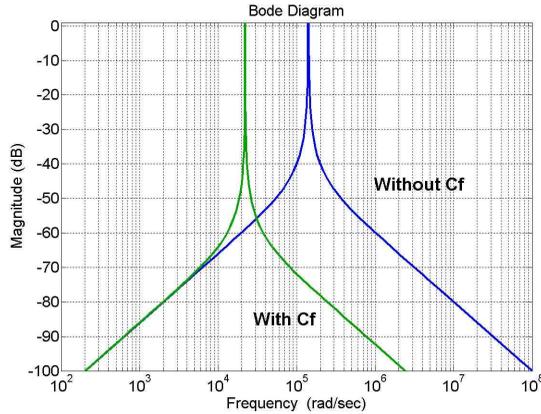


Fig. 5 Bode plot of leakage current to CM voltage

3. 제안된 방식

그림 6은 고효율 태양광 인버터의 효율을 더욱 개선하기 위해 IGBT와 FRD를 모두 MOSFET으로 대체한 초고효율 태양광 인버터를 나타낸다. MOSFET은 테일(tail) 전류가 없으므로 IGBT에 비해 턴오프(turnoff) 손실이 적다. P-N 접합에서의 전위 장벽에 의한 옴셋 전압이 없으므로 IGBT와 FRD에 비해 전도 손실 또한 감소하며, 특히 전류, 즉 출력이 낮을수록 전도 손실이 더욱 줄어든다. 하지만 MOSFET body diode의 큰 역회복 전류에 의해 스위칭 손실, 특히 턴온(turnon) 손실이 크게 증가하는데, 이를 해결하기 위해 그림 7과 같은 SPS 회로를 추가한다.

SPS 타이밍은 그림 8과 같고, 시간 구간에 따른 주요 특징은 다음과 같다.

T1: 인덕터에 흐르는, 즉 부하 전류가 S2를 통해 환류(freewheeling)한다. 전도 손실을 줄이기 위해 S2는 S1과 상보적인(complementary) 스위칭을 한다.

T2: S2를 끄면 전류는 S2의 body diode로만 흐른다. 이 때, 만약 S1을 켜다면 body diode의 큰 역회복 전류로 인해 엄청난 스위칭 손실이 초래된다.

T3: S1을 켜기 전에 S5를 먼저 켜다. S2의 body diode로 흐르던 전류가 S5로 전이된다. Body diode의 큰 역회복 전류로 인해 S5의 턴온 전류에 큰 오버슈트

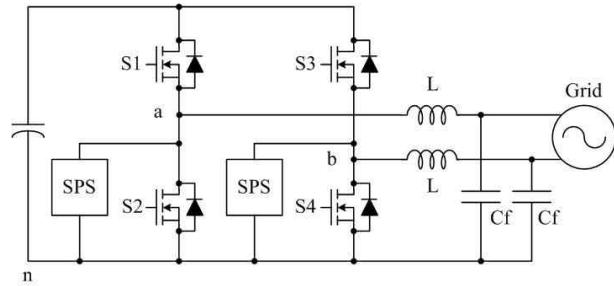


Fig. 6 Proposed highly efficient inverter

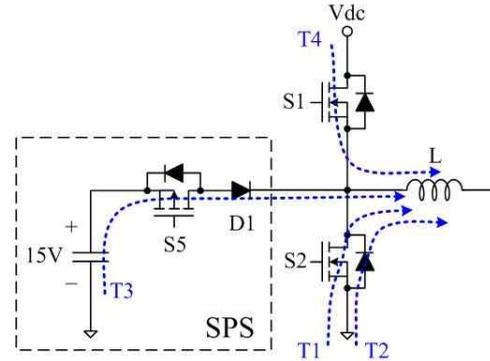


Fig. 7 SPS circuit

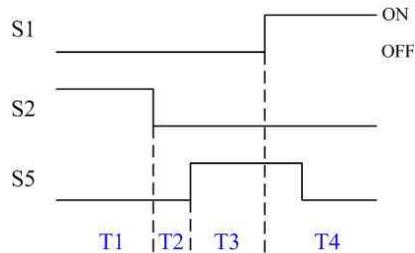


Fig. 8 SPS timing diagram

가 발생한다. 하지만 S5의 양단 전압이 직류단 고전압 380V가 아닌 저전압 15V에서 감소하므로 턴온 손실은 미미하다. 마찬가지로 이유로 body diode의 턴오프 손실 또한 미미하다.

T4: S1을 켜다. S1의 턴온 전류가 FRD D1의 역회복 전류에 의해 결정되므로 기존의 IGBT 태양광 인버터와 비슷한 수준의 턴온 손실을 기대할 수 있다. S5를 켜다. S5의 턴오프 손실은 영이다.

요약하면, 저전압 브리지 회로를 추가로 구성하여 스위칭 전압의 크기를 줄임으로써 MOSFET body diode의 큰 역회복 전류에 기인한 스위칭 손실의 증가를 막을 수 있다.

S5는 P-channel MOSFET을 사용하여 간단히 비절연으로 구동할 수 있으며, 정격 전압은 40V면 충분하다.

Table 2 Part numbers of switching devices

Solution	Switching device	Part number
Conventional	IGBT(with FRD)	IKW30N60T
Proposed	MOSFET	IPW60R045CP
	SPS MOSFET	FDD4243
	SPS FRD	IDD03E60



Fig. 9 3kW prototype

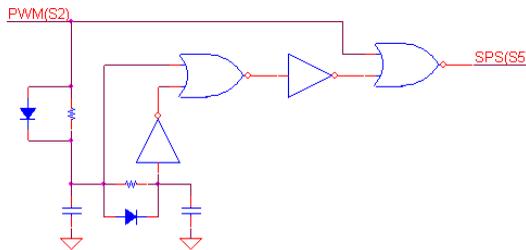


Fig. 10 Circuit diagram for SPS signal generation

전도 시간은 불과 $1\sim 2\mu\text{sec}$ 으로 스위칭 주기에 비해 매우 짧으며 60Hz의 반 주기 동안은 스위칭하지 않는다. 따라서 S5의 정격 전류는 주 스위치 S1에 비해 크게 낮다. D1의 정격 전압은 600V로 높지만 정격 전류는 S5와 마찬가지로 낮다. 15V 전원은 S2의 게이트 구동을 위한 전원을 공용할 수 있으므로 별도로 공급할 필요가 없다. 결과적으로 SPS 회로에 따른 추가 비용과 손실은 모두 미미하다.

인덕터 전류가 반대 방향으로 흐르면 태양광 인버터는 단위 역률로 운전되므로 S2는 계속 켜고 S3이 스위칭한다. 결과적으로, S1과 S3은 body diode로 전류가 흐르지 않으므로 SPS 회로 없이 MOSFET으로 대체될 수 있다.

4. 실험

제안된 방식의 효율 개선과 안정된 동작을 입증하기

위해 3kW급 시제품(그림 9)을 제작하였다. 별도의 언급이 없는 한 실험 조건은 표 1의 시뮬레이션 조건과 동일하다. 스위칭 소자의 부품 번호는 표 2와 같다. 스위칭 전류 및 전압을 측정하기 위해 각각 100MHz(band width) 프로브(probe) CP031, 100MHz 프로브 ADP305가 사용되었다. 오실로스코프는 400MHz WR44Xi-A이고, Math 메뉴의 곱셈과 적분 기능을 이용하여 스위칭 손실을 측정하였다. 주 스위치와 SPS 스위치의 게이트 구동 IC는 각각 IR2113, ICL7667이며, 입력 전압 신호의 시간 구간 T2 및 T3(그림 8)은 각각 $1\mu\text{sec}$, $1.5\mu\text{sec}$ 이다. 주 스위치의 PWM 신호는 마이크로컨트롤러에서 생성되며, SPS 신호 생성을 위한 회로는 그림 10과 같다.

그림 11은 SPS를 하지 않을 때 S1의 턴온 전류, 전압, 및 손실을 보여준다. 시험 조건은 상온에서 직류단 전압 100V, 부하 전류 5A, 그리고 di/dt 는 $40\text{A}/\mu\text{sec}$ 이다. MOSFET body diode의 역회복 전류로 인한 오버슈트가 35A, 턴온 손실이 $710\mu\text{J}$ 에 달한다. Softness factor가 거의 영이므로 body diode의 턴오프 손실은 거의 영이다. 참고로, 역회복 전류가 크고 softness factor가 거의 영인 이유로 HVIC인 IR2113에 노이즈 오작동이 발생하여 부득이 직류단 전압, 부하 전류, di/dt 를 모두 낮게 설정하였다.

반면에 동일한 시험 조건에서 SPS를 하면 그림 12와 같이 전류의 오버슈트가 5A, 턴온 손실은 $135\mu\text{J}$ 로 줄어든다. 참고로, 전류의 오버슈트는 D1의 역회복 전류(S5 전류를 보면 거의 영)도 Cdv/dt 에 의한 shoot-through 전류도 아닌 S2의 기생 커패시턴스를 충전하는 전류에 기인한다. S5는 전류에 큰 오버슈트가 발생하지만 전압이 거의 영이므로 턴온 손실은 $10\mu\text{J}$ 에 불과하다. 또한 SPS를 하지 않을 때의 S1과 달리 S5는 스위칭 손실은 거의 증가시키지 않으면서 노이즈 발생을 누그러뜨리기 위해 스위칭 속도를 낮출 수 있다.

그림 13은 기존의 방식과 제안된 방식의 출력에 따른 스위칭 소자에서의 전도 손실과 스위칭 손실을 나타낸다. I-V 곡선은 제조사가 제공하는 datasheet를 참고하였고, 턴온 및 턴오프 손실은 모두 직접 측정하였다. 또한 출력에 따라 온도가 달라지므로 그에 따른 I-V 곡선과 턴온 및 턴오프 손실의 변동을 반영하였다. 그림 13에서 주목할 만한 특징은 제안된 방식의 전도 손실은 출력이 감소함에 따라 더욱 감소한다는 사실이며, 이는 MOSFET의 순저항성에 기인한다. MOSFET은 테일 전류가 없으므로 스위칭 손실 또한 그만큼 줄어든다. 결과적으로, 실질적인 에너지 절약을 가능할 수 있도록 실제 일사량에 따른 출력 분포를 반영하여 정의한 European 효율에서 48%로 가장 높은 비중을 차지하는 정격의 50% 출력에서 제안된 방식의 손실은 12.3W로 기존 20.7W의 거의 절반으로 감소한다.

그림 14는 출력에 따른 효율을 나타낸다. 낮은 출력에서 보다 정확한 효율 비교를 위해 스위칭 소자에서의

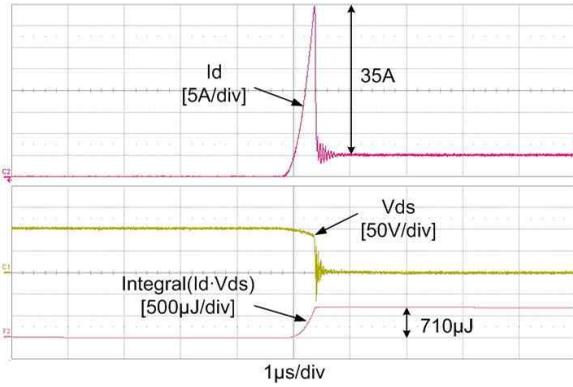
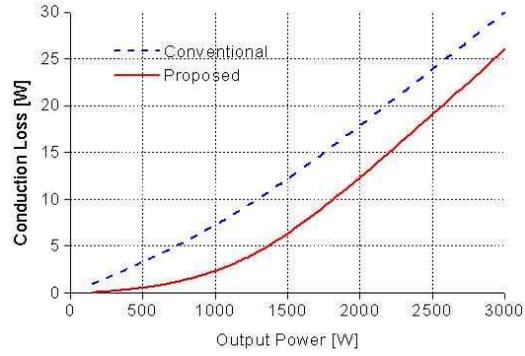


Fig. 11 Turn-on of S1 without SPS



(a)

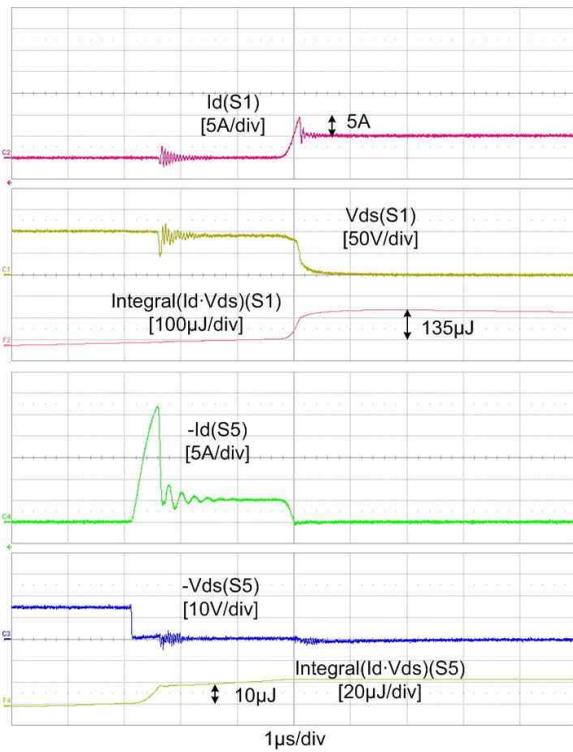
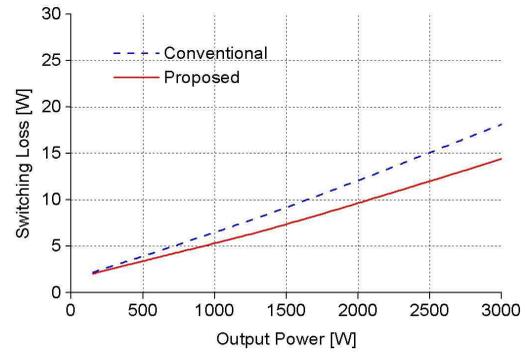


Fig. 12 Turn-on of S1 with SPS



(b)

Fig. 13 Power loss comparison: (a) conduction loss, (b) switching loss

손실뿐만 아니라 게이트 구동 회로에서의 손실, SPS 회로의 입력 전원으로도 사용하는 15V 전원(SMPS)에서의 손실까지 반영하였다. 기존의 방식과 제안된 방식의 European 효율은 각각 98.5%, 99.0%이다.

끝으로 그림 15의 운전 실험 결과는 그림 3의 시뮬레이션 결과와 일치하며, 안정적으로 누설 전류가 억제되고 계통 측 전류가 단위 역률로 제어됨을 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서는 고효율 태양광 인버터의 효율을 더욱 개선한 초고효율 태양광 인버터를 제안하였다. 3kW급 시작품의 실험 결과를 통하여 제안된 방식의 효율 개선

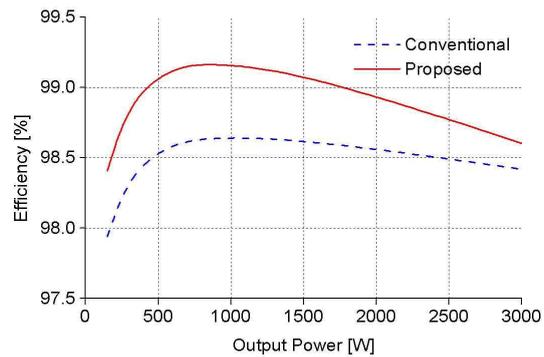


Fig. 14 Efficiency comparison

과 안정된 동작을 검증하였다. 제안된 초고효율 태양광 인버터의 장점 및 기대 효과는 다음과 같다.

1. 비슷한 효율을 기대할 수 있는 SiC MOSFET이나 SiC JFET을 사용한 것보다 저렴하다.
2. 방열 비용이 줄어들고, 향상된 효율만큼 발전 수입이 증가하거나 전기 사용 요금이 절약된다.
3. 기존 효율을 유지하는 대신 스위칭 주파수를 증가시킴으로써 필터, 특히 인덕터의 크기를 줄여서 제품의 원가를 절감할 수 있다.

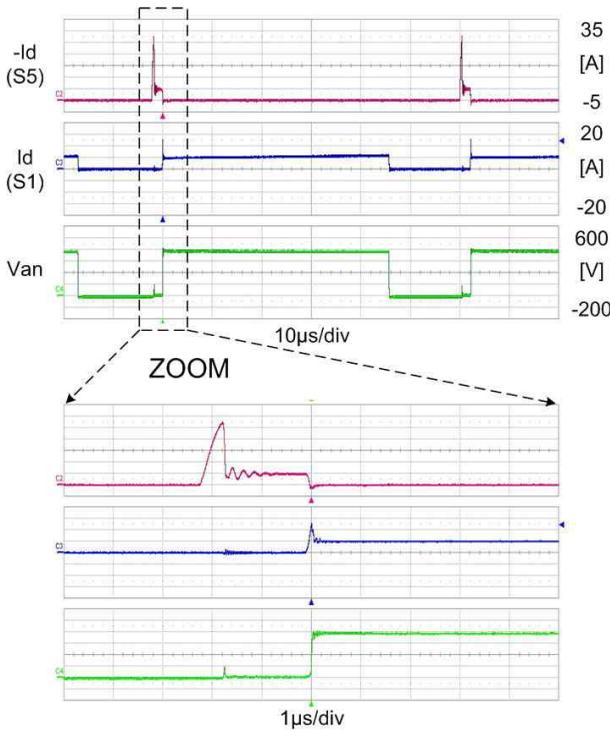
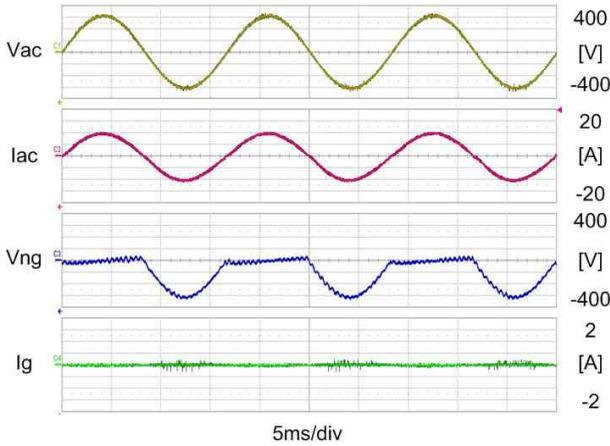


Fig. 15 Running test result

본 연구는 동의대학교 교내연구비(2013AA133) 지원을 받아 수행되었습니다.

References

[1] Oscar Lopez, Remus Teodorescu, Francisco Freijedo, and Jesus DovalGandoy, "Leakage current evaluation of a single-phase transformerless PV inverter connected to the grid," *22th Applied Power Electronics Conference*, Anaheim, USA, pp. 907-912, Feb. 2007.
 [2] Bruno Burger and Dirk Kranzer, "Extreme high

efficiency PV-power converters," *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-13, Sep. 2009.

[3] Samuel Vasconcelos Araujo, Peter Zacharias, and Regine Mallwitz, "Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 9, pp. 3118-3128, Sep. 2010.
 [4] Bruno Burger, "Power electronics for grid connected PV," *International Seminar Power Electronics for Photovoltaics*, OTTI, Munich, Germany, pp. 163-216, Jun. 2009.
 [5] H. Schmidt, S. Christoph, and J. Ketterer, "Current inverter for direct/alternating currents, has direct and alternating connections with an intermediate power store, a bridge circuit, rectifier diodes and an inductive choke," German Patent DE10 221 592 A1, Dec. 2003.
 [6] M. Victor, F. Greizer, S. Bremicker, and U. Huebler, "Verfahren zum umwandeln einer elektrischen gleichspannung einer gleichspannungsquelle, insbesondere einer photovoltaik-gleichspannungsquelle in eine wechselfspannung," German Patent DE102004 030 912 B3, Jan. 2006.
 [7] Roberto Gonzalez, Jesus Lopez, Pablo Sanchis, and Luis Marroyo, "Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, No. 2, pp. 693-697, Mar. 2007.
 [8] Bo Yang, Wuhua Li, Yunjie Gu, Wenfeng Cui, and Xiangning He, "Improved transformerless inverter with common-mode leakage current elimination for a photovoltaic grid-connected power system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 2, pp. 752-762, Feb. 2012.
 [9] Shinya Shimizu, Michika Uesugi, Tomoaki Toshi, Takahisa Endo, and Hiroshi Mochikawa, "Application and development of high efficient inverter system for air conditioner," *Domestic Conference of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Industry Application*, I-113, 2006 (Japanese).



류형민(柳炯旻)

1975년 3월 11일생. 1997년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2004년~2006년 인텍에프에이 연구원. 2006년~2009년 페어차일드코리아반도체 연구원. 2009년~현재 동의대 전기공학과 교수. 당 학회 JPE 편집위원.