Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2015) 29(7) : 87~94
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2015.29.7.087 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 29-7-12

소프트스위칭 방식을 적용한 절연형 승압용 DC/DC 컨버터

(Isolated Step-up DC/DC Converter applied Soft-switching Method)

김영주* · 황정구 · 김선필 · 박성준 · 송성근**
(Young-Ju Kim · Jung-Goo Hwang · Sun-Pil Kim · Sung-Jun Park · Sung-Geun Song)

Abstract

Recently, renewable energy sources are under the spotlight. due to the depletion of fossil fuels and environmental problem for the carbon dioxide. Among them, research on the Photovoltaic System using solar energy systems has been actively conducted.

In this paper, we propose boosting the insulated DC/DC converter topologies Applied to soft-switching methods used in photovoltaic PCS. The proposed topology is of a type that combines a series of full-bridge converter and a boost converter, a full bridge converter and applying the insulation and soft switching system, the output voltage boost stage is carried out for the boost control. The proposed circuit validity was verified through the PSIM simulation and 5kW PV PCS Prototype and experiments.

Key Words : PV-PCS, DC-DC Converter, Soft Switching, Boost Converter

1. 서 론

국·내외 에너지 환경은 새로운 도전과 변화를 예고하고 있다. 전 세계적으로는 석유자원의 고갈 및 고유가, 기후변화협약 발효에 따른 국제적인 새로운 환경 및 무역질서의 도래, 그리고 중국, 인도 등 거대 개도국의 에너지 수요 폭발 등이 가져올 엄청난 도전에 부딪히고 있다. 여기에 일본의 후쿠시마 원자력 발전소 사고 이후 실시된 제한 정전은 신재생에너지원에서 생산된 전력의 잉여분이나 예비전력을 저장하기 위한 ESS(Energy Storage System) 기술이 요구되면서 에너지가 양방향 형태로 전달되는 PV PCS 연구가 활발히 진행되고 있다[1-2].

ESS의 응용 기술은 잉여 에너지를 저장할 뿐만 아니라 전력품질개선 및 계통안전의 신뢰성을 높일 수 있으며, 일반적으로 배터리 에너지의 충/방전을 이용하여 전력 사용의 효율성을 극대화하는 BESS (Battery Energy Storage System)기술이 사용되고 있다[3].

미 연방 에너지 규제 위원회(FERC)에서는 DR (Demand-Response) 프로그램 제도를 시행함으로서

* Main author : Doctorate course, Department of Electirical Engineering, Chunnam National University.
** Corresponding author : Center Manager, Digital Convergence Research Center, KETI
Tel : 062-975-7030, Fax : 062-975-7069
E-mail : sgsong@keti.re.kr
Received : 2015. 6. 3
Accepted : 2015. 6. 25

Copyright ⓒ 2015 KIIEE All right's reserved
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

전력 시장가격이 매우 비싼 시간대의 수요를 감축하여 전력시장 가격급등을 억제하고, 전력생산비용을 저감시키는 제도를 도입하고 있다.

본 논문에서는 신재생에너지원의 잉여전원을 ESS에 저장하는 태양광 일체형 ESS 시스템에 사용되는 고효율 5kW DC/DC 컨버터 시스템에 대한 연구를 수행하였으며, 제안된 DC/DC 컨버터 토폴로지는 단방향의 절연형 구조로 절연을 위한 풀브리지단과 출력단 전압제어를 위한 부스트단으로 구성되어 있는 새로운 형태의 절연형 DC/DC 컨버터 토폴로지를 제안하고 그 타당성을 시뮬레이션 및 시제품 제작을 통한 실검증을 통하여 검증하였다.

2. 대용량 절연형 DC/DC 컨버터

2.1 위상천이 풀브리지 DC/DC 컨버터

절연형 DC-DC 컨버터에는 일반적으로 푸쉬풀 컨버터, 하프브리지 컨버터, 풀브리지 컨버터 등이 사용된다. 푸쉬풀 컨버터와 하프브리지 컨버터는 소용량 파워 용량에 적용되며, 5kW과 같은 중용량 컨버터에 적용되는 일반적인 회로 방식이 그림 1과 같은 풀브리지 컨버터이다. 5kW급 MPPT 전력변환장치와 같이 컨버터 입력이 저전압 대전류인 경우 손실이 크므로 효율을 향상시키기 위한 소프트 스위칭 기술이 필요하다.

일반적으로 많이 사용되는 위상천이 풀브리지 컨버터는 다음 그림 1과 같이 모든 스위치가 0.5 고정 듀티로 Q_1과 Q_2, Q_3와 Q_4를 각각 온, 오프를 반복하면서 출력을 제어하기 위한 듀티비 만큼 위상차이를 주면서 동작을 하며 별도의 회로 없이 변압기의 누설 인덕턴스만을 이용하여 스위치의 영전압스위칭(Zero Voltage Switching -ZVS)이 가능하다. 총 4개의 스위치 중 래깅레그(Lagging leg)에 있는 스위치 Q_3, Q_4는 부하전류에 의해서 ZVS 조건이 결정되므로 매우 쉽게 ZVS를 할 수 있는 반면, 리딩레그(Leading leg)의 Q_1과 Q_2는 누설 인덕턴스의 흐르는 전류로만 ZVS 조건이 결정되므로 ZVS가 어렵게 된다. 따라서 변압기 누설 인덕턴스가 작거나 경부하 시 ZVS가 이루어지지 않게 되며, 에너지 전달이 되지 않는 환류구간에서 순환전류에 의한 도통 손실이 발생하는 문제가 있다. 또한 입출력 전압차가 큰 경우 누설 인덕턴스에 의한 듀티 손실이 커져 턴비가 증가하고 정류부 다이오드의 역방향 회복에 의한 전압 서지를 막기 위한 스너버 회로가 반드시 필요하다[4].

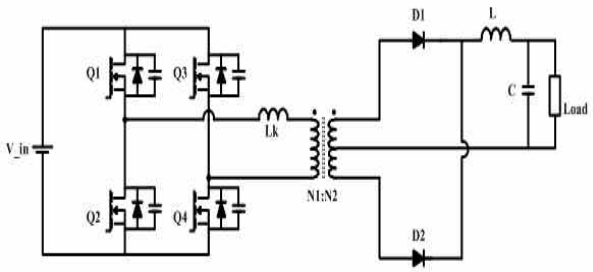


그림 1. 위상천이 풀브리지 컨버터 구조
Fig. 1. Phase-shift full bridge CVT configuration

2.2 제안된 절연형 DC/DC 컨버터

본 논문에서 제안하는 절연형 DC/DC 컨버터는 그림 2와 같이 태양광 셀과 컨버터의 절연을 위하여 변압기를 사용하였으며, 변압기에 인가되는 전압을 형성하기 위해 풀브리지 컨버터 회로를 사용하였다. 변압기 2차측 출력은 정류기를 통하여 DC로 만들어지고, DC/DC 컨버터의 출력단 전압제어 및 승압을 위한 부스트 컨버터를 구성하였다.

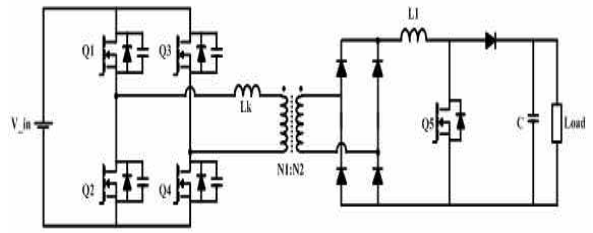


그림 2. 제안된 DC/DC 컨버터
Fig. 2. proposed DC/DC Converter

제안하는 컨버터의 풀브리지단은 그림 2와 같이 대각선 스위치 Q_1과 Q_4, Q_2와 Q_3이 각각 동일하게 스위칭을 하며 스위치 Q_1과 Q_4의 턴온 구간을 50%, Q_2와 Q_3의 턴온 구간을 50%로 하는 대칭 상보적 스위칭으

로 구형파 형태의 출력을 내보내고, 변압기 2차측은 정류기를 통하여 DC전압으로 만들어진다. 변압기는 턴수비가 1:1로써 태양광셀과 컨버터의 절연을 목적으로 하고, 실제 출력제어는 부스트단에서 수행한다. 부스트단의 스위치 Q_5는 턴온 듀티비를 D로 하여 최종 출력전압을 제어한다.

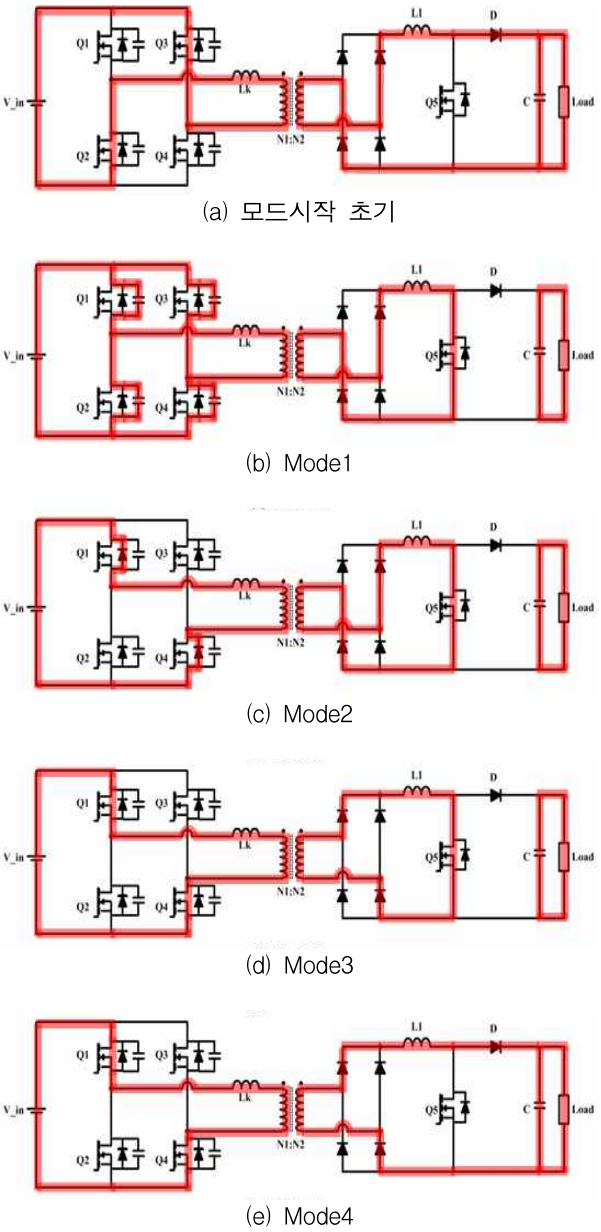
표 1. 위상천이 컨버터와 제안된 컨버터 비교표
Table 1. Phase-shift converter and proposed converter comparison chart

구 분	기존 위상천이 풀브리지 컨버터	제안한 DC/DC 컨버터
스위치 개수	4	5
다이오드 수	2	5
소프트스위칭	제약적 조건에서 가능	기생요소 공진을 이용한 전 부하 영역에서 가능

기존의 위상천이 풀브리지 컨버터와 제안된 DC/DC 컨버터에 대한 비교표를 표 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 기존 위상천이 풀브리지 컨버터에 비해 제안한 DC/DC 컨버터의 스위치 개수가 1개 더 많으며 다이오드 개수는 3개 더 많지만, 제안된 DC/DC 컨버터는 기생요소 공진을 이용하여 손쉽게 소프트스위칭을 구현할 수 있으며, 전 부하영역에서 가능한 장점이 있기 때문에 신재생에너지 발전시스템 등의 시스템에서 효율을 극대화할 수 있는 토폴로지이다.

제안하는 컨버터는 8개의 동작모드로 구분되며 그림 3은 반주기의 해당되는 모드의 등가회로를 나타내었다. 나머지 반주기의 모드는 상보적으로 동작하므로 생략하였다.

그림 3 (a)는 모드시작 초기단계이며 스위치 Q_1과 Q_4는 오프, Q_2과 Q_3은 온 상태이다. Q_1과 Q_4의 기생커패시턴스의 전압은 입력전압 V_{in}과 동일한 전압이 걸린다. 모드 1은 Q_1과 Q_4가 턴온 시 Q_2과 Q_3가 턴오프되면서 누설인덕턴스 L_k를 통해 흐르는 전류는 Q_2, Q_3의 내부커패시터를 충전시키고 Q_1, Q_4의 내부커패시터를 방전시키게 된다. 모드 2는 스위치의 내부 커패시턴스가 충, 방전을 완료하며 변압기의 누설 인덕턴



(a) 모드시작 초기

(b) Mode1

(c) Mode2

(d) Mode3

(e) Mode4

그림 3. 전류에 따른 구간별 동작 모드
Fig. 3. Operation mode according to current

스에 인가되는 전압에 의해 $I(L_k)$는 증가한다. 이 때 Q_1과 Q_4의 내부 다이오드를 통해 흐른다. 모드 2인 경우 누설리액터의 전류 $I(L_k)$의 기울기는 변압기의 누설 리액터 L_k가 변압기 2차측 Boost 컨버터의 리액터 L_1보다 현저히 작으므로 식 (1) 에 의해 정의되어진다.

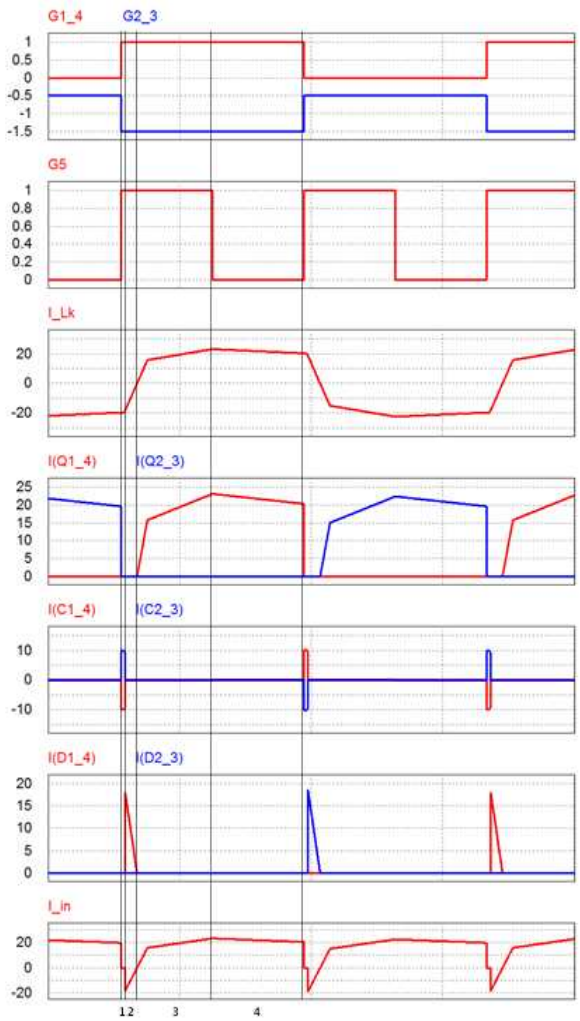


그림 4. 전류에 따른 구간별 동작 모드 파형
Fig. 4. Operation mode waveform according to current

$$\triangle I(L_k) \approx \frac{V_{in}}{L_k} \quad (1)$$

$$\triangle I(L_k) = \frac{V_{in}}{L_1} \quad (2)$$

$$\triangle I(L_k) \approx \frac{V_{in} - V_{out}}{L_k} \quad (3)$$

L_k : 누설인덕턴스, V_{in} : 입력전압 , V_{out}: 출력전압

식 (1)은 모드 3에서 변압기가 여자될 때까지 유지되다가 변압기 여자가 종료되는 시점부터는 출력단의 부스트 컨버터의 전류 식에 의해 모드 3에서는 식 (2), 모드 4에서는 식 (3)에 의해 전류가 형성된다.

Q_1과 Q_4에 게이트 신호가 인가되어 내부 다이오드로 흐르던 전류가 채널의 역방향으로 흐르는 동기정류방식으로 동작하며 전류는 계속적으로 증가하여 0이 된다. 모드 3은 Q_1과 Q_4 채널의 역방향으로 흐르던 전류가 자연적으로 채널의 정방향으로 흐르게 되어 ZVS 턴온이 성립된다. 변압기의 누설 인덕터에 흐르는 $I(L_k)$는 역방향으로 증가하기 시작한다. 마찬가지로 Q_1과 Q_4의 전류도 증가하기 시작한다. 모드 4는 Q_5가 턴오프되면 다이오드 D는 도통되고 커패시터 C는 충전을 시작한다. L_1의 전류가 감소하기 시작하며 1차측의 L_k의 전류 또한 감소한다.

각 모드별 동작파형은 그림 4와 같다.

풀브리지 컨버터 스위치의 기생커패시터와 누설인덕턴스 간 공진은 풀브리지컨버터 및 부스트컨버터의 스위칭주파수와 밀접한 관계를 갖고 있지 않으며, 단순한 풀브리지단 스위치의 소프트스위칭 동작을 위한 공진이다. 기생커패시터와 누설인덕턴스간의 공진주파수는 다음과 같이 정의된다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{k1}+L_{k2}) \times C_{sw}}} \quad (4)$$

f_r : 기생커패시터와 누설인덕턴스간 공진주파수
L_{k1} : 변압기 1차측 누설인덕턴스
L_{k2} : 변압기 2차측 누설인덕턴스
C_{sw}: 풀브리지단 스위치의 기생 커패시턴스

3. 시뮬레이션을 통한 검증

그림 5는 제안된 절연형 DC/DC 컨버터의 타당성 검증을 위하여 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 진행한 회로도이다. 제어기는 DLL파일을 사용하여 C언어를 이용하여 프로그램을 하였으며, 태양광 모듈을 포함한 모든 부분은 PSIM의 컴포넌트를 이용하였다. 시뮬레이션 파라미터 값을 표 2에 나타내었다.

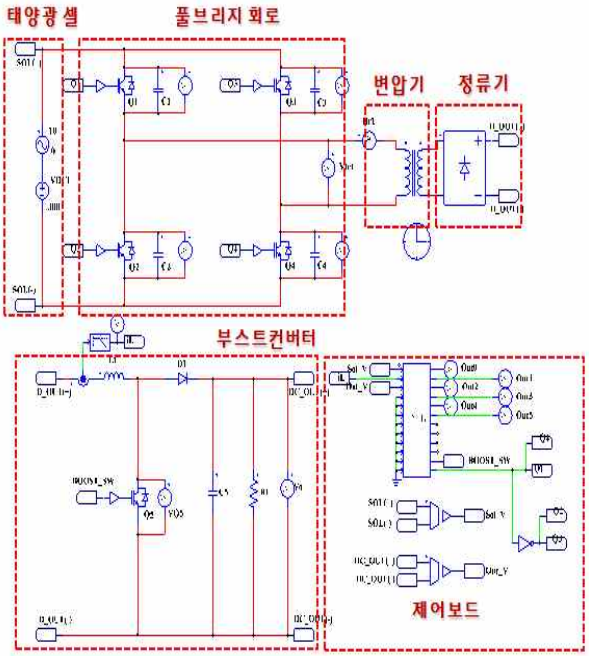


그림 5. 제안된 DC/DC 컨버터 시뮬레이션 회로도
Fig. 5. proposed dc/dc converter simulation circuit

그림 6은 제안한 토폴로지의 풀브리지단 소프트스위칭을 검증하기 위한 파형이다. Q_1, Q_4는 Q_2, Q_3과 대칭 상보적으로 스위칭하고 스위치의 기생커패시터와 누설인덕턴스간의 공진을 사용하여 영전압 및 영전류 스위칭을 구현하였다. Q_1, Q_2, Q_3, Q_4는 스위치가 턴온될 때 ZCS, 턴오프될 때 ZVS로 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. simulation parameter

Item	Value
Full-Bridge Switch Freq	20kHz
Boost Switch Freq	40kHz
Boost Duty Ratio	0.5
Transformer Turn Ratio	1 : 1
Transformer Lm	1.5mH
Transformer Lk	15uH
Switch Parallel	0.02uF
Switch Deadtime	2us

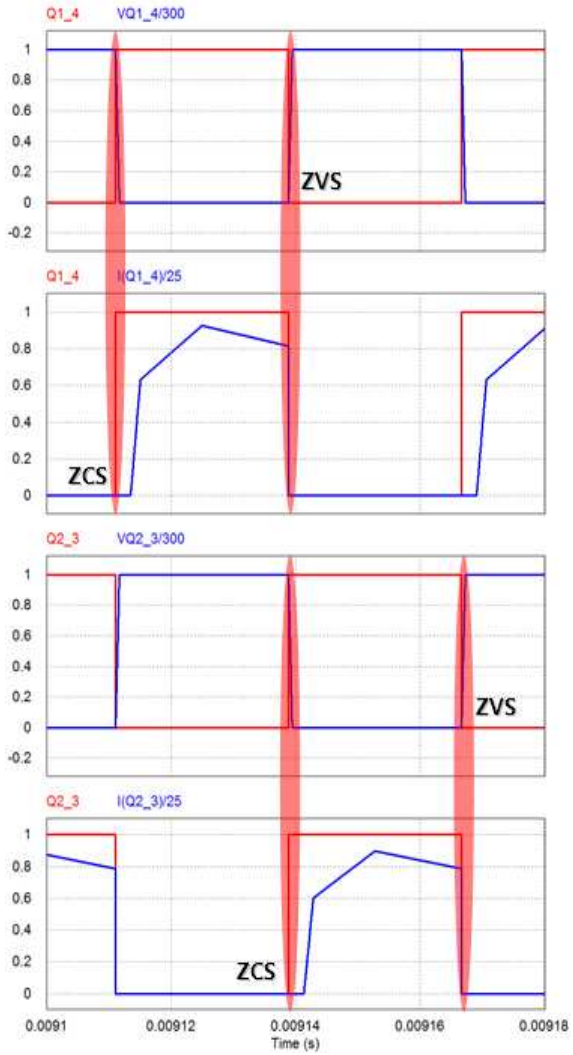


그림 6. 제안된 DC/DC 컨버터 풀브리지단 소프트스위칭 파형
Fig. 6. proposed dc/dc converter full-bridge converter soft-switching waveform

그림 7은 전체 시스템의 동작 특성을 확인하기 위한 파형이다. 위에서부터 입력전압, 풀브리지 컨버터 스위치의 게이트 신호, 부스트 컨버터 스위치의 게이트 신호, 부스트 컨버터단 인덕터 전류, 출력전압의 파형을 나타내고 있으며, 풀브리지 스위칭 주파수는 부스트 컨버터단 스위칭 주파수의 2배로 하여 시뮬레이션을 진행하였다. 입력전압 300V 인가시 부스트 컨버터 듀티비를 0.5로 하였을 때 출력전압 500V가 나오는 것을 확인하였다.

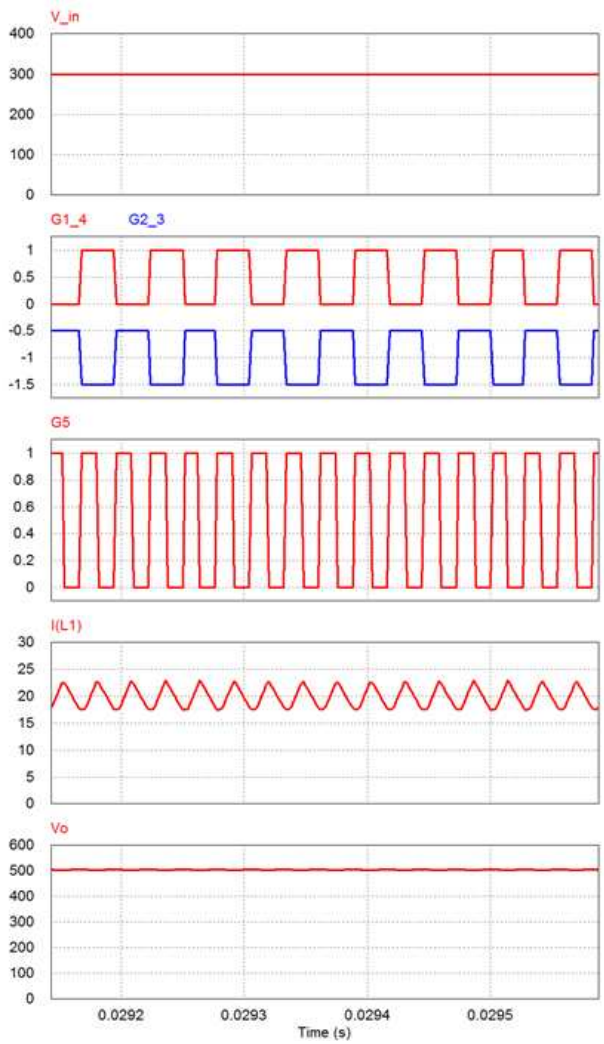
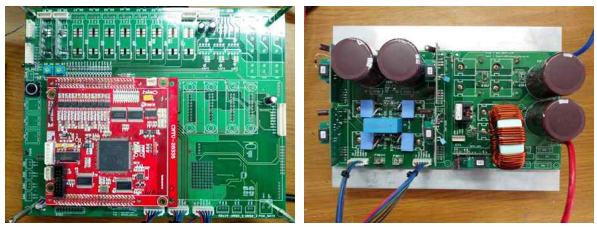


그림 7. 전체 시스템의 동작 특성 파형
Fig. 7. Entire system operating characteristic waveform

4. 시험결과

그림 8 (a)는 풀브리지 컨버터와 부스트 컨버터의 스위치 제어 및 센싱을 위해서 Ti사의 TMS302F28335를 이용한 제어보드를 구성한 사진이며, 그림 8 (b)는 풀브리지 컨버터와 부스트컨버터의 파워보드이다. 풀브리지단의 소프트스위칭을 위해 18nF의 공진커패시터를 스위치4개와 병렬로 구성하였으며, 변압기의 누설인덕턴스는 16.5uH로 구성하였다. 또한 부스트컨버터의 인덕터는 500uF으로 설정하였으며, 각 풀브리지컨버터와 부스트컨버터의 스위칭 주파수는 40kHz로 설정하여 풀브리지컨버터는 듀티비를 0.5로하여 상호 인터리브방식으로 스위칭하였으며, 부스트컨버터의 듀티비는 고정으로하여 오픈루프 제어로 실험을 진행하였다.



(a) 제어보드 (b) 파워보드

그림 8. 제안된 DC/DC 컨버터 제어보드 및 파워보드
Fig. 8. proposed dc/dc converter control board & power board

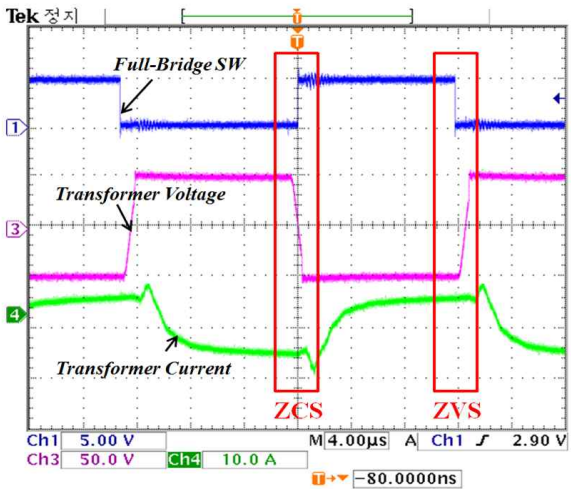


그림 9. 풀브리지 스위칭 신호, 변압기 1차측 전압, 전류 파형(Vin : 100V)
Fig. 9. Full-bridge switching signal, transformer voltage and current

그림 9는 입력전압이 100V일 때 풀브리지 한 암의 스위칭 게이트 신호 파형과 변압기 1차측의 입력 전압 및 전류 파형이다. 파형에서 보는 바와 같이 스위치가 온될 때 ZCS, 오프될 때 ZVS가 이루어짐을 확인하였다. 그림 10은 입력 전압과 부스트단 시비율에 따른 전체 시스템의 효율 그래프이다. 입력 전압은 100V부터 시작하여 50V 간격으로 증가시키면서 출력단의 부

하는 45Ω을 고정으로 사용하여 측정하였다. 또한 부스트 컨버터의 듀티비를 0.03, 0.1, 0.2 점차적으로 증가시켜 효율을 측정하였다. 전체 부하 영역에서 90% 이상의 높은 효율을 보였으며, 부하 5kW에서 최대효율 96.1%를 달성하였다.

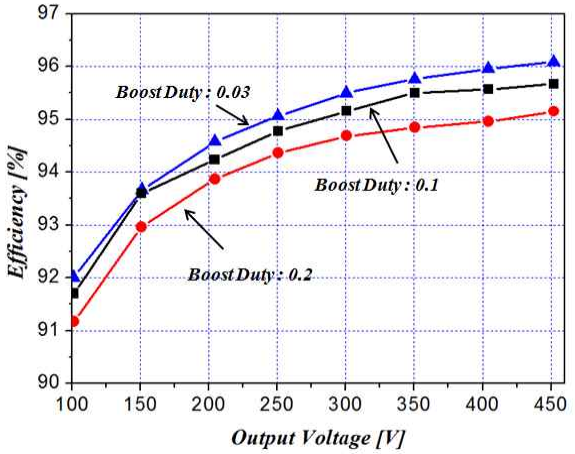


그림 10. 입력 전압과 부스트단 시비율에 따른 전체 시스템 효율 그래프

Fig. 10. Entire system efficiency graph according to Input voltage and boost converter duty ratio

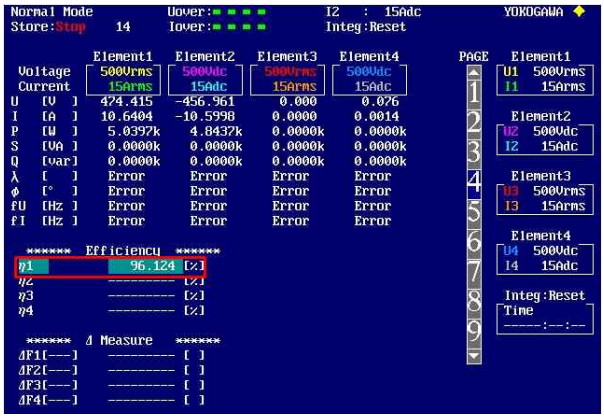


그림 11. 전체 시스템 최고 효율

Fig. 11. Entire system maximum efficiency

5. 결 론

본 논문에서는 최근 수요가 증가하고 있는 태양광 PCS에 사용할 수 있는 소프트 스위칭 방식을 적용한 절연형 승압용 DC/DC 컨버터 토폴로지를 제안하였다. 제안된 회로는 PV-PCS 특성상 신뢰성을 향상시키기 위한 절연형 DC/DC 컨버터 토폴로지로써, 풀브리지 컨버터의 스위치 기생 커패시턴스와 변압기의 누설인덕턴스와 공진을 이용한 소프트스위칭을 구현함으로써 스위칭 손실을 감소시켜 효율을 상승할 수 있는 회로를 제안하였다. 제안된 회로는 5kW 시작품 제작을 통하여 최대 효율 96.1%를 달성하였으며, 특히 신재생에너지원에서 생산된 전력 잉여분이나 예비 전력을 저장하기 위한 ESS(Energy Storage System)의 수요에 부응할 수 있고 전력 품질 개선 및 계통안전의 신뢰성을 높일 수 있을 것이라 사료된다.

References

[1] Sung-Jun Park, Sung-Geun Song, Yong-Gu Kim "Research Trend of Solar Generation PCS", THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, KIPE MAGAZINE 15(3), 2010.6, 47-53 (7 pages).

[2] Hee-Seo Lee, Dong-Hee Kim, Gyu-Yeong Choe, Byoung-Kuk Lee, "Analysis of PV PCS Boost Converter Efficiency", THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, Power Electronics Annual Conference , 2011.7, 255-256 (2 pages).

[3] Minjae Kim, Seongjin Oh, "Recently trend & role of large scale BESS PCS for Transmission Investment Deferral", THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, Power Electronics Annual Conference , 2012.7, 323-324 (2 pages).

[4] S. P. Mun, K. Y. Suh, H. W. Le, M. Nakaoko, H. B. Shin, "Full-bridge Soft-Switching PS-PWM DC-DC Converter for Fuel Cell Generation System", The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers, Proceedings of KIIEE Annual Conference, 2005.11, 371-376.

◇ 저자소개 ◇

김영주(金永柱)

1969년 5월 11일생. 1993 원광대 전기공학과 졸업. 2002년 한양대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 전남대 대학원 전기공학과 박사과정. 2010년~현재 전남과학대 화학부사관과 조교수.

황정구(黃貞九)
1985년 9월 5일생. 2011년 전남대 전기공학과 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

김선필(金善必)
1985년 4월 7일생. 2011년 한밭대 제어계측공학과 졸업. 2013년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2013년~현재 전남대 전기공학과 박사과정.

박성준(朴晟濬)
1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년 동 대학원 지능기계공학과 졸업(박사). 1996~2000년 거제대학 전기과 조교수. 2000~2003년 동명대학 전기공학과 조교수. 2003년~현재 전남대 전기공학과 교수.

송성근(宋成根)
1975년 9월 16일생. 1998년 전남대 공과대학 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2004년 (주)프로컴 시스템 연구원. 2007년~현재 전자부품연구원 에너지변환연구센터 센터장.