

## 부분공진기법을 이용한 태양광발전 제어시스템

(The Photovoltaic generation control system using partial resonant method)

고강훈\* · 이현우\*\* · 김영철\*\*\* · 최광주\*\*\*\*

(Kang-Hoon Koh , Hyun-Woo Lee, Young-cheal Kim, Kwang-Joo Choi)

### 요 약

본 논문은 트랜스포머를 제거하고 부분공진 스위칭 기법을 적용한 승·강압초퍼와 고효율의 PWM 인버터를 결합한 트랜스포머리스형 계통연계 시스템을 구성하게 되므로 소형경량화가 가능하며, 비용저감과 신뢰성 향상을 도모할 수 있다. 이러한 시스템의 장점으로서 태양전지의 발전전압의 크기에 관계없이 임의의 전력을 부하와 계통에 송전할 수 있으며, 계통과 동상의 신호로 제어함으로써 항상 고역률을 얻을 수 있다.

### Abstract

This paper describes Transformer-less type utility interactive system that is combined with buck/boost chopper applying partial resonant method, which remove Transformer, and high efficient PWM inverter. Therefore, it is possible to make it lightweight, to cut down the cost, and to improve its reliability. What the merits of this system are that we can transmit arbitrary power to load and utility regardless of generating voltage magnitude of solar cell and we can always obtain high factor controlling by equal phase signal with utility.

### 1. 서 론

현재 태양광발전시스템은 주로 도서지역이나 낙도 지역에 국한하여 소용량의 형태로 제한적으로 이용되었다. 태양광 발전시스템이 대체 에너지원으로서 의미를 가지기 위해서는 설비용량의 증대, 기존의 계통선과 연계운전이 가능해야 한다. 그리고 태양전지에서 얻은 가변성 직류전원을 사용하기 편리한 상용 교류형태로 바꾸어 주는 직·교류변환장치가 필수적이다[1].

계통연계형 인버터는 태양광발전 시스템에서 공급

\*정회원 : 경남대학교 대학원 전기공학과 박사과정

\*\*정회원 : 경남대학교 전기전자공학부 교수

\*\*\*정회원 : 쌍용중공업(주) 연구소 대리

\*\*\*\*정회원 : 광덕종합건설(주) 대표이사

접수일자 : 2000년 3월 18일

되는 직류전력을 변환하여 계통선에 교류전력으로 전달해주는 에너지 변환장치로서 현재 세계적으로 실용화되어 있는 대부분의 시스템이 전력용량이 수 백 kW급에서 수 MW급이다. 태양전지를 전원으로 하는 계통형 인버터는 상용전력계통과 병렬 접속하므로 접속하는 배전선의 상태변화에 대한 추종성이 양호함과 동시에 계통의 주파수나 전압 변화에 대한 운용능력, 계통사고시에 적절히 대응하는 기능 및 자체 발생 고조파로 인한 통신유도장애가 발생하지 않도록 하는 능력을 보유하여야 한다[1][2].

아울러 계통연계형 인버터에 있어서 태양전지의 직류 입력 변동과는 무관하게 정격 출력을 낼 수 있어야 하고, 계통과 연계 협조 성능 향상을 위하여 출력 고조파를 제거하여야 하며, 일반 가정에 설치시 장기간 연속 사용시 성능 변화가 없어야 한다는 조

건을 만족하여야 한다.[3]

태양광발전시스템에서 연계형 시스템은 상용주파 변압기 절연방식, 고주파변압기 절연방식과 트랜스포머리스방식이 있으며, 그 중에서 상용주파변압기 절연방식, 고주파변압기 절연방식은 태양전지와 계통의 절연, 입출력 절연을 위해 트랜스포머를 사용하기 때문에 소형·경량화, 저가격화, 고효율화에 있어서 문제점이 되고 있다. 이러한 문제점을 개선시키기 위해 트랜스포머리스 방식을 이용한 태양광발전시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 트랜스포머리스 시스템은 입력단에 DC-Link단을 사용하여 인버터와 연계하게 된다. DC-link단을 초퍼로 사용하므로 트랜스포머를 제거할 수 있기 때문에 소형·경량화, 저가격화, 고효율화 할 수가 있다[4].

일반적으로 초퍼를 사용한 DC-Link단을 이용할 때 고주파 스위칭 동작시 스위칭손실과 노이즈, 잡음 등이 발생하게 되고 연계인버터의 오동작 또는 손실을 발생시키게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 부분공진 스위칭을 적용시킴으로서 스트레스 손실 및 왜형을 감소시킬 수 있으며 연계인버터는 Unipolar-PWM 방식을 사용하여 고조파 성분저감 및 동위상의 전력을 계통에 공급할 수 있다[6][7].

본 논문은 트랜스포머를 제거하고 부분공진 스위칭 기법을 적용한 승·강압초퍼와 고효율의 PWM인버터를 결합한 트랜스포머리스형 계통연계 시스템을 구성하게 되므로 소형경량화가 가능하며, 비용저감과 신뢰성 향상을 도모할 수 있다.

## 2. 트랜스포머리스형 계통연계형 인버터

### 2.1. 트랜스포머리스형 시스템의 특징

태양전지와 인버터의 절연을 위한 상용트랜스포머를 제거하고, 태양전지의 출력을 항상 최대전력을 추종(MPPT : Maximum Power Point Tracking)할 수 있도록 부분공진기법을 적용한 승·강압 DC-DC초퍼(정전력 출력특성)와 Unipolar-PWM제어를 통한 단상 PWM인버터와 출력필터로 구성된다. 제어기법은 전압형 전류제어 시스템이다. 그림1에 구성회로도 를 나타내었다. 승·강압초퍼를 사용함으로써 인버터 출력제어시 입력전압 변동에 의한 제어가 필요 없으며, 출력에 포함된 고조파를 일정하게 제어할 수 있으므로 교류필터를 소형화 할 수가 있다[2].

PWM인버터는 Unipolar-PWM제어기법을 적용하므로 부의 스위칭 손실을 줄일 수 있으며, 저차 고조파를 제거할 수 있으므로 고차 고조파 필터로 고조파를 감소시키고, 부분공진 승·강압초퍼를 통한 불연속전류모드로 동작하므로 스위칭 디바이스의 손실 저감을 도모할 수 있다[8].

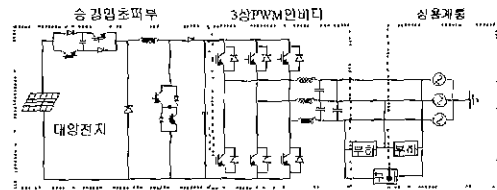


그림 1. 부분공진기법을 이용한 트랜스포머리스 계통연계 인버터의 회로  
Fig. 1. The circuit of transformer-less utility interactive inverter using partial resonant method

### 2.2. 부분공진기법의 승·강압 초퍼시스템

태양전지의 출력전력은 동작점에 있어서 전류×전압 = 전력으로 주어지며 일사량변화에 따라서 전력이 최대가 되는점을 최대동작점(MPPT)이라고 하며, 이 동작점에 있어서 전류, 전압은 각각 최적 동작전류, 최적 동작전압이라 한다. 그림 2에 나타난 기존의 승·강압 초퍼회로에 부분공진 소프트 스위칭 기법을 적용함으로써 기상조건에 따라 최대출력점이 변해도 항상 최대출력 전력점에서 동작하도록 제어할 수 있다.[2]

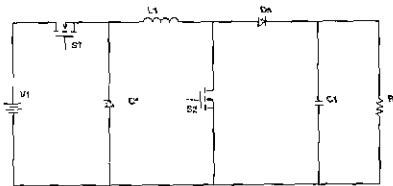


그림 2 기존의 승·강압회로  
Fig. 2 The convention of buck·boost circuit

기본구성은 강압용 스위칭 소자 S1, S2와 승압용 스위칭 소자 S3, S4와 승강압용 인덕터 Lr 및 스너버 콘덴서 Cr로 구성되며 그림 3에 나타내었다. 스위치 턴-온시 인덕터 Lr의 전류는 영으로 되어 ZCS동작을 하게 되므로 턴-온 손실이 적게된다. 일반적으로 스위치는 턴-오프 손실이 크며, 스위칭 주파수의 증가와 비례하게 된다. 반면 제안된 회로는 콘덴서

부분공진기법을 이용한 태양광발전 제어시스템

Cr의 전압이 영에서 동작하므로 스위치는 ZVS동작을 하므로 스위칭 손실이 없도록 한다. 스위치 S1과 S2, S3와 S4는 동일한 듀티율로서 스위칭하므로 제어회로가 간단하며 인덕터 전류가 2개의 회로로 분류되어 하드 스위칭보다 전류용량을 늘릴 수 있다. 또 스너버 콘덴서 Cr은 스위치 턴-온에 의해 부분공진회로를 구성하게되어 축적한 에너지를 입력전원측으로 회생하여 스너버 손실을 줄일 수 있다. 따라서 소용량의 스너버 콘덴서를 사용하여도 변환기의 효율은 저하되지 않는다[8].

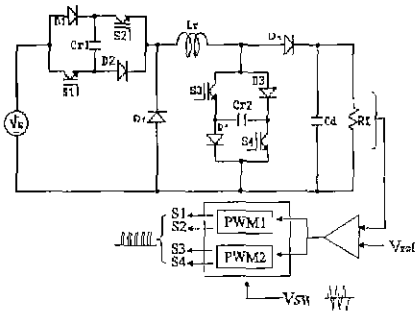


그림 3 소프트 스위칭에 의한 승·강압 초퍼회로  
Fig. 3 The buck·boost chopper circuit by soft-switching

표 1. 승·강압 스위칭동작표  
Table 1. The table of buck·boost switching operating

구분	S1, S2스위치	S3, S4스위치
승압동작시	ON	ON/OFF
강압동작시	ON/OFF	OFF

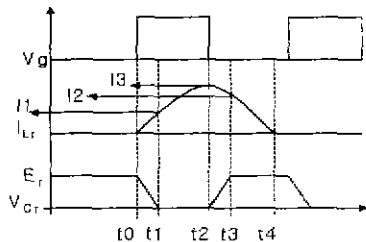


그림 4 부분공진 승·강압 초퍼의 이상적인 파형  
Fig. 4 The ideal waveform of partial resonant buck·boost chopper

그림 4는 부분공진 스위칭 기법을 적용했을 때의 승·강압 동작시의 이상적인 파형을 나타낸 것이다. 표 1은 승·강압 스위칭동작의 테이블을 나타내었다.

스위칭 제어방법은 입력전압과 기준전압을 승·강압 톱니파와 신호와 비교하여 발생된 PWM신호로서 승·강압 스위치를 구동시키게 된다. OP-AMP의 구성은 그림 5에 나타내었으며, 입력전압의 변동에 따른 제어 PWM신호 파형은 그림 6과 같다.

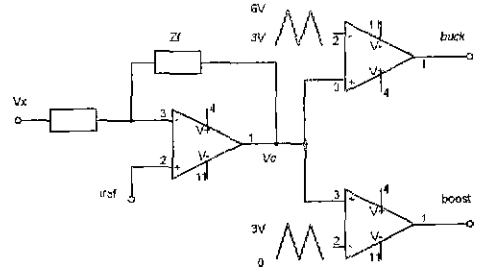


그림 5. 제어부의 OP-AMP구성  
Fig. 5. The OP-AMP configuration of control parts

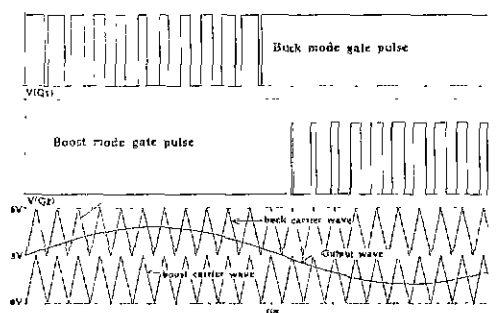


그림 6. 승·강압 PWM제어동작파형  
Fig. 6. The operating waveform of buck·boost PWM control

가) 강압 동작시

그림 7은 강압동작 특성을 분석하기 위하여 한주기를 4개의 동작모드로 나누어 나타낸 것이다. 강압초퍼회로로 S3, S4는 항상 off 상태가 되며, S1, S2가 on, off 스위칭을 하여 강압초퍼로서 동작하게 된다. S1, S2가 on일 때는 S1, S2-Lr-Vcd-Vs의 경로로 전류  $i_1$ 이 흐르고, 부하에 전압이 인가된다. 다음 S1, S2가 off되면 L에 축적되었던 에너지가 Lr-Vcd-Df-Lr의 경로를 통하여 환류전류  $i_2$ 가 흐른다. 이때의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\bullet \text{ S1, S2가 on일 경우 : } L \frac{di_1}{dt} = V_s - V_b$$

• S1, S2가 off일 경우 :  $L \frac{di_2}{dt} = -V_b$

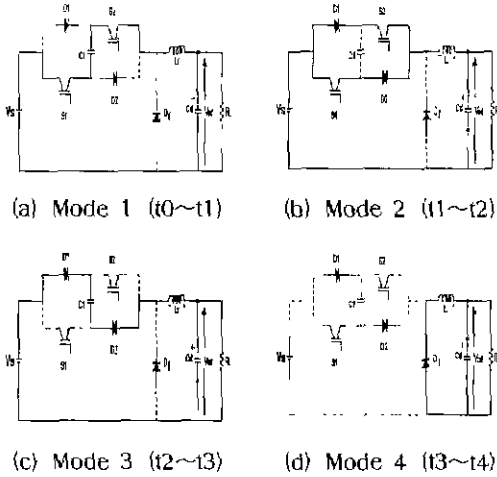


그림 7. 강압동작시 한주기의 스위칭동작모드  
Fig. 7. The switching operating mode of a period at buck operating

나) 승압동작시

그림 8과 같이 병렬로 연결된 부분공진 소프트 스위칭이란 점 이외에 강압형 컨버터와 동일한 구조를 가진다. S1, S2는 항상 on상태가 되고, S3, S4가 on, off스위칭을 하여 승압초퍼로 동작하여 부하에 전원을 공급하는 회로로서  $V_s$ 와  $V_b$ 의 관계와  $I_s$ 와

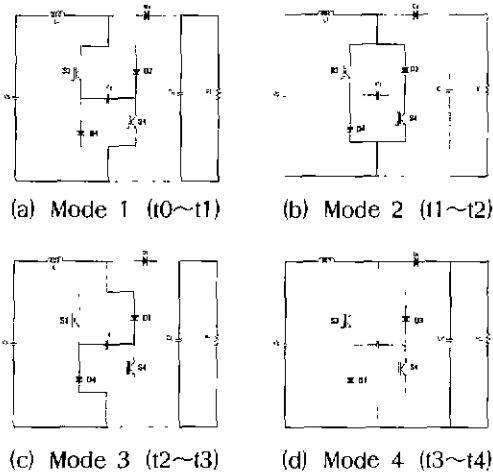


그림 8. 승압동작시 한주기의 스위칭동작모드  
Fig. 8. The switching operating mode of a period at boost operating

$I_b$ 의 관계를 구하면

- $V_s = (1 - k)V_b$
- $I_s = 1/(1 - k)I_b$

가 된다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1. 부분공진기법의 승·강압 초퍼시스템

가) 시뮬레이션에 사용된 회로정수

표 2. 시뮬레이션에 사용된 회로정수  
Table 2. The parameter for the simulation

구 분	승 압	강 압
평활 인덕턴스 $L_r$	65 [ $\mu$ H]	65 [ $\mu$ H]
평활 콘덴서 $C_d$	2200 [ $\mu$ F]	2200 [ $\mu$ F]
스너버 콘덴서 $C_{r1}$	.	0.1 [ $\mu$ F]
스너버 콘덴서 $C_{r2}$	0.1 [ $\mu$ F]	.
스위칭주파수 $f$	20 [kHz]	20 [kHz]
듀티율 $D$	30 [%]	30 [%]
출력 검출 저항	$R_L=50[\Omega]$	$R_L=50[\Omega]$

나) 강압동작시

그림 9는 강압동작시 스위치 양단에 걸리는 전압과 흐르는 전류를 나타낸 것이다. 부하측 리플은 아주 미소한 것을 알 수 있으며, 시간  $t_0$ 에서 턴-온 동작시 ZCS동작을, 시간  $t_2$ 일 때 ZVS동작을 하는 것을 알 수 있으며 손실이 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

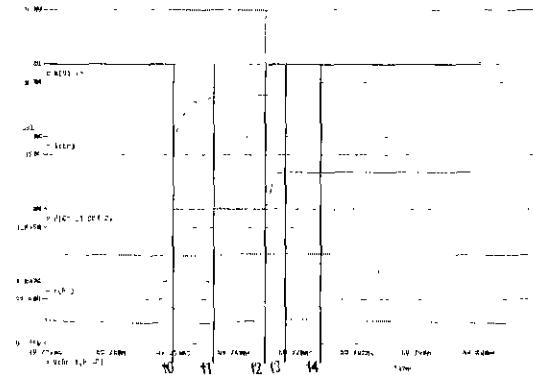


그림 9 강압동작시 각부 시뮬레이션 파형  
Fig. 9 The part of simulation waveform at buck operating

다) 승압동작시

그림 10은 승압동작시 스위치 양단에 걸리는 전압과 흐르는 전류를 나타낸 것이다. 부하에 나타나는 리플은 강압 동작시와 동일하게 아주 미소한 것을 알 수 있으며, 시간 t0에서 턴-온 동작시 ZCS동작을, 시간t2일 때 ZVS동작을 하는 것을 알 수 있으며 손실이 거의 발생하지 않음을 확인 할 수 있다.

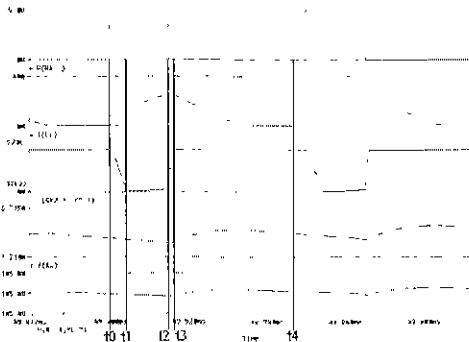


그림 10. 승압동작시 각부 시뮬레이션 파형  
Fig. 10. The part of simulation waveform at boost operating

각 동작파형을 통해 알 수 있듯이 공진형 스위칭 일 경우, 전압, 전류가 정현파로 제어 하지만, 부분공진 스위칭 기법 또는 소프트 스위칭 기법을 통한 전압, 전류제어는 거의 구형파에 가까운 파형으로 제어가 되며 짧은 기간내에 이루어짐을 확인하였다. 그림 11(a)(b)는 승압동작시 하드스위칭과 소프트 스위칭의 입력전류의 스위칭에 따른 주파수 분석을 나타낸 것이다. 소프트 스위칭시 기본과 성분이 증가함을 알 수가 있다.

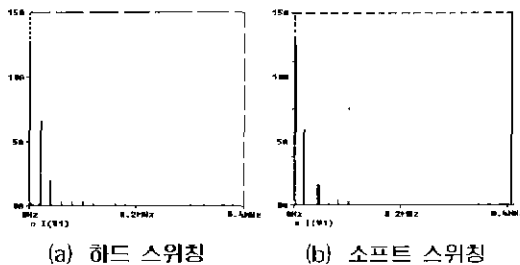


그림 11. 승압동작시 입력전류 주파수 분석  
Fig. 11. The frequency analysis of input current at boost operation

그림 12는 승압동작시 듀티율을 변화시켰을 때의 출력전압을 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 부분공진 스위칭을 사용할 경우가 일반 하드스위칭보다 동일 듀티에서 보다 30%정도 높은 출력을 얻을 수 있다. 그러므로 낮은 듀티율에서도 원하는 출력전압을 얻을 수 있기 때문에 스위칭 도통손실을 저감시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

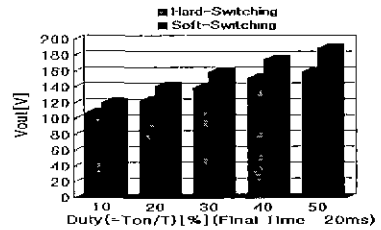


그림 12. 듀티율변화에 따른 출력전압 비교  
Fig. 12 The comparison for output voltage according to changing duty ratio

3.2. 계통연계 인버터

가) 시뮬레이션에 사용된 회로정수

표3은 시뮬레이션에 사용된 각각의 파라미터 값을 나타낸 것이다.

그림 13은 인버터의 Unipolar-PWM신호와 인버터에 입력되는 불연속 전류를 나타낸 것이다. 그림 14는 입력신호  $v_i$  와 직류입력 전류  $I_d$ , 콘덴서  $C_o$  전압  $e_d$ , 인버터 출력전류  $I_o$ , 출력전압  $v_o$  의 파형이다. 직류전류  $I_d$ 는 입력신호의 2배의 주파수로 맥동하고 있으며, 이 맥동으로 인한 인버터 출력전류 또한 왜곡된 파형으로 나타난다.

표 3. 시뮬레이션 조건  
Table 3. condition of Simulation

태양전지입력전압 $V_{dc}$	DC 320[V]
공진용 리액터 $L_d$	65[ $\mu$ H]
공진용 콘덴서 $C_d$	100[nF]
정현파 입력신호 $f_i$	60[Hz]
삼각파 캐리어 신호 $f_c$	1.08k[Hz]
출력측 필터 리액터 $L_f$	3.5[mH]
출력측 필터 콘덴서 $C_f$	15[ $\mu$ F]
저항부하 $R_d$	100[ $\Omega$ ]

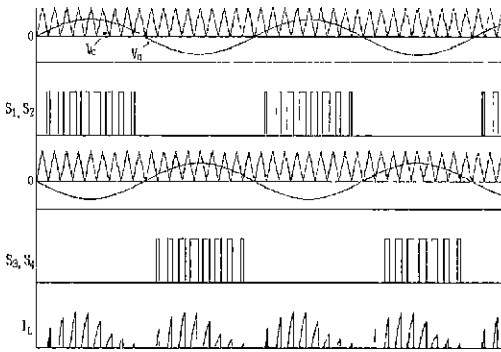


그림 13. 인버터부의 제어신호와 전류파형  
Fig. 13. Control signals and current waveform of Part of inverter

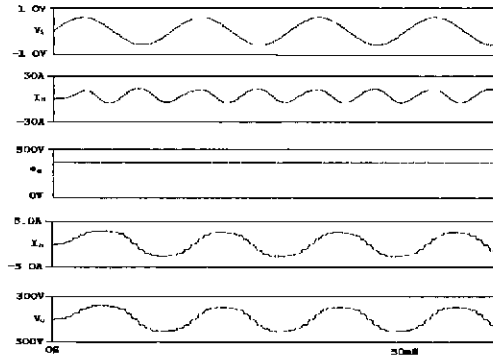
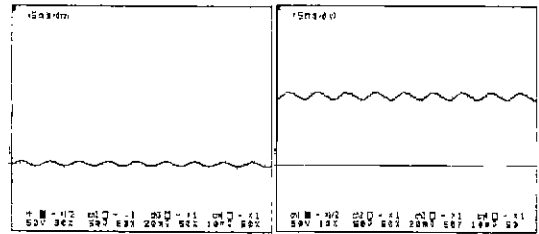


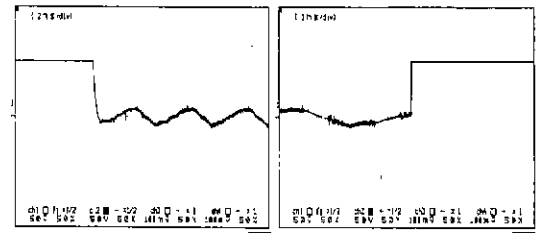
그림 14. 입·출력 전압, 전류파형  
Fig. 14. Voltage and current Waveforms of input · output

그림15(a)는 무부하시 직류전압이 전원전압 주파수의 2배의 주파수로 맥동하고 있으며, 맥동분은 약 3%이내를 나타내고 있으나 그림15(b)는 맥동분이 약 5%로 증가하여 나타나고 있다. 즉, 무부하시와 부하시의 전원전압 영향이 달리 나타났으나, 계통과 연계시 제한하는 맥동을 범위를 만족하는 것으로 나타났. 그림 15(c)는 계통연계를 하기 위하여 인버터를 투입했을 때 특성을 나타내고 있다. 인버터 투입시 시간 지연없이 인버터 입력전압을 확립하였으며, 그림15(d)는 계통과 연계를 차단했을 경우의 파형을 나타내고 있다. 그림 16은 인버터 입력전압  $e_d$ 는 일정한 직류전압으로 인버터에 전원을 공급함을 알 수 있다. 그림 17에서 출력전압, 전류파형은 입력신호와 동위상으로 역률 1로 출력되고 있으며, 따라서 계통과 연계시 인버터 출력전력과 계통전력의 상지연이

생기지 않으며, 역률 1을 유지하여 부하에 전력을 공급하고 있음을 알 수가 있었다.



(a) 무부하시 직류전압 (b) 부하시 직류전압



(c) 인버터 투입시 (d) 인버터 정지

그림 15. 계통연계시 특성  
Fig. 15. Characteristics of The Utility Interactive

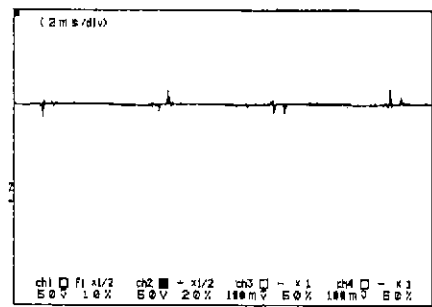


그림 16. 인버터 입력전압  
Fig. 16. input voltage of inverter

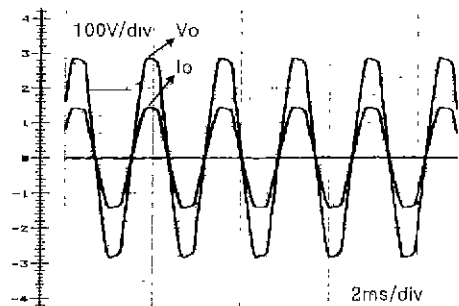


그림 17. 인버터 출력전압, 전류  
Fig. 17. output voltage and current of inverter

### 3. 결론

본 논문에서 태양광 발전시스템의 계통연계 시스템을 트랜스포머리스화하기 위해 DC-Link단에 승·강압형 초퍼를 적용, 안정적인 DC전압을 연계 인버터에 공급할 수 있다. 또한 DC-Link단에서 리플이 심한 태양전지의 출력을 최대전력추종(MPPT)제어하기 위해 승·강압초퍼는 승압캐리어 신호와 강압캐리어 신호의 2단의 캐리어 신호를 통해 안정된 승·강압 스위칭 동작을 하게 된다. 안정된 DC전압을 공급받은 계통연계형 인버터는 전류 순시치 제어와 PLL제어를 통해 계통과 동상의 무효, 유효전력을 공급한다. 반면 트랜스포머리스화를 태양전지와 입력과의 절연에서만 이루었고, 계통연계형 인버터와 계통과의 절연은 완전한 직류차단 보호 장치 등과 같은 보호장치설계가 미흡하다. 따라서 보다 안정적인 보호장치를 설계하게 된다면 실제 개인주택용 발전 시스템 보급 확장 할 수 있을 것이다. 아울러 계통연계 법안의 정책적인 수립과 권장을 통해 새로운 에너지 시장을 구축하게 되리라 여겨진다.

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (1999-2-302-014-3) 지원으로 수행되었음

### 참고 문헌

(1) 太陽光發電懇話會, “太陽光發電システムの設計と施工”, Chm社, pp.24~27,170~177, 1996.  
 (2) 大西徳生, 高田茂生, “太陽電池の最大出力方式の比較と昇降壓チョッパ回路を用いた制御特性”.T.IEE Japan Vol.112-D, No 3, pp. 250~258, 1992.

(3) 長尾道彦 他 2人, “昇降壓定電力PWMインバータを用いた太陽光発電システム”, 信學技報, PE92-74, pp.35~41, 1993.  
 (4) 長尾道彦 他 2人, “昇降壓PWM電力形インバータを用いた太陽光発電システム”, 電學論D, 114巻 9号,pp.885~892, 1994.  
 (5) Michihiko Nagao, Hideo Horikawa, Koosuke Harada, “Photovoltaic system sing buck-boost PWM Power Inverter” T.IEE Japan, Vol.114-D, pp.885~892, 1994.  
 (6) Y.M Jiang and F.CLee, “A New Control scheme for buck-boost Power Factor Correction Circuit”, VPEC, pp. 43~47, 1993  
 (7) 김희준, “공진형 컨버터의 기술현황 및 향후과제”, 전력전자학회지, pp. 2407~2418, 1998.  
 (8) 고강훈, 이현우외 3명, “승강압초퍼의 부분공진 인버터를 이용한 계통연계형 태양광발전시스템”, 99전력전자기술대의 논문집, pp.278~281, 1999.

### ◇ 저자 소개 ◇

**고 강 훈 (高康薰)**  
 1970년 8월 14일생. 1997년 경남대학교 공과대학 전기공학과 졸업 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 현재 경남대학교 대학원 박사과정.

**이 현 우 (李鉉雨)**  
 1953년 4월 28일생. 1979년 동아대학교 전기공학과 졸업 1984년 영남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동아대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년 오사카공대 객원연구원, 현 경남대학교 전기전자공학부 교수.

**김 영 철 (金永喆)**  
 1964년 10월 26일생. 1991년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 경남대학교 대학원 전기공학과 박사. 현 쌍용중공업(주) 연구소/태양광 동력발전 담당

**최 광 주 (崔光珠)**  
 1954년 7월 18일생. 1984년 경남대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1987년 중앙대학교 건설대학원 수료, 현재 광복중학건설(주) 대표이사.