

태양광발전과 계통연계를 위한 Buck-Boost 전류원형 PWM 인버터에 관한 연구

양근령, 강필순, 김철우
부산대학교

A Study of Buck-Boost Current-Source PWM Inverter for Utility Interactive Photovoltaic Generation System

Geun-Ryoung Yang, Feel-Soon Kang, and Cheul-U Kim
Pusan National University

ABSTRACT

In a utility interactive photovoltaic generation system, a PWM inverter is used for the connection between the photovoltaic arrays and the utility. The dc current becomes pulsated when the conventional inverter system operates in the continuous current mode and dc current pulsation causes the distortion of the ac current waveform. To reduce pulsation of dc input current, This paper presents a Buck-Boost PWM power inverter and its application for residential photovoltaic system. The PWM power inverter is realized by combining two sets of a high frequency Buck-Boost chopper and by making it operate in the discontinuous conduction mode. In this paper, we show the Buck-Boost PWM power inverter circuit, its equivalent circuit and basic differential equations and the power flow characteristics are clarified when the proposed inverter is interconnected with the utility lines. In conclusion, the proposed inverter system provides a sinusoidal ac current for domestic loads and the utility line with unity power factor.

1. 서 론

본 논문에서는 비교적 효율이 높으면서도 전반적인 시스템 가격을 경감시킬 수 있는 태양광 발전 시스템용 인터페이스 회로인 전류 불연속 모드로 동작하는 2개의 Buck-Boost Topology 조합형 전류원형 PWM 인버터를 제안한다. 제안하는 인버터 회로는 4개의 MOSFET 스위치와 2개의 FR(Fast recovery) 다이오드, 2개의 인덕터 및 LC 필터로

구성된 된 full-bridge 형태의 회로로서 직류 입력 전력의 맥동에 의한 출력전력의 왜형을 방지하기 위하여 전류 불연속 모드로 동작 되어진다^[1]. 따라서 복잡한 입력전류 제어기 없이도 회로가 고역율로 동작되어질 수 있으며, 이로 인해 회로가 매우 간단한 구조가 될 수 있다. 또한 매 반주기 마다 초평을 위한 스위치 1 개와 극성 전환을 위한 스위치 1개 만이 사용되어지므로 스위치에 의한 손실이 작다. 이와 더불어 제안하는 인버터는 출력단 측의 승압 필요 시, 부가적인 승압 장치 없이도 태양전지 발전전압 보다 높은 실효치의 교류출력을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 제안하는 인버터 회로의 각 모드별 동작 특성 및 입출력 특성에 관하여 이론적인 분석을 시행하였으며 P-SPICE를 통해 회로의 동작 특성에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. 그리고 하드웨어 구현의 타당성을 검증하기 위하여 Prototype을 제작하고 실험하였다.

2. 시스템 구성

그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 제안하는 인버터는 기본적으로 태양전지(PV), 2개의 Buck-Boost형 전력변환기, 필터, 부하 그리고 계통으로 구성되어 있다.

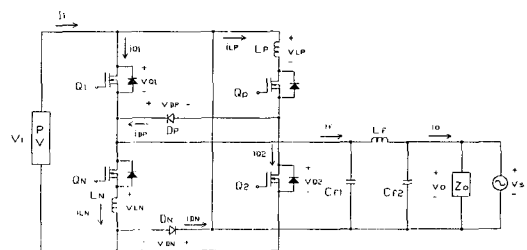


그림 1 Buck-Boost 전류원형 PWM 인버터 회로구성도
Fig. 1 Circuit configuration of Buck-Boost current-source PWM inverter

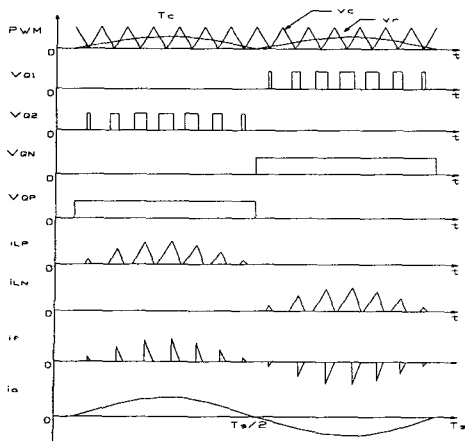


그림 2 Buck-Boost 전류원형 PWM 인버터의 각 부 파형
 Fig. 2 Waveforms of Buck-Boost current-source PWM inverter

그림 2에는 게이트 신호 V_{Q1} , V_{Q2} , V_{QP} , V_{QN} , 인덕터 전류 i_{LP} , i_{LN} , i_r 및 출력전류 i_o 에 대한 파형들이 각각 나와 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 제안하는 인버터에서는 인덕터 L_P 및 L_N 전류 i_{LP} , i_{LN} 을 스위칭 주기 T_C 동안 계통전압 궤환신호 v_r 에 따라 불연속적으로 흐르게 하므로써 출력전류 i_o 가 계통전압 v_s 를 추종하도록 하며 스위칭 주파수 f_c 에 의한 전류 리플 성분은 인버터 출력 단 측의 LC 저역 통과 필터로 제거시키므로써 회로에 대한 역률 개선 및 회로손실의 최소화를 실현한다.

PWM 제어용으로 사용되어지는 기준 신호 v_r 은 계통 전압 v_s 로부터 검출한 신호를 사용하게되고 이 기준신호에 따라 인덕터 전류가 불연속적으로 흐르게 되므로 복잡한 입력 전류센서 없이도 출력전압 v_o 와 동상을 이루는 정현적인 출력전류 i_o 가 얻어 질 수 있으며 결국 인버터 회로가 매우 높은 역률을 가질 수 있게 된다.

제안하는 인버터에 대한 스위칭 펄스의 형태를 살펴 보면, v_r 의 첫번째 반 사이클 동안에는 Q_2 에 PWM 파가 그리고 Q_p 에 구형파가 인가되며 기준 신호 v_r 의 두번째 반 사이클 동안에는 Q_1 에 PWM 파가 그리고 Q_N 에 구형파가 인가되어짐을 알 수 있다. 이러한 스위치 구조에서는 정극성의 출력전압을 발생 시킬 시에는 Q_p 와 Q_2 만이 사용되어지고 역극성의 출력전압을 발생시킬 시에는 Q_N 과 Q_1 만이 사용되어지게 되므로 회로 동작 중의 스위칭 손실이 작게 됨을 알 수 있다.

2.2 인버터 동작모드 분석

각 모드별 분석을 단순화 시키기 위하여 인버터 회로가 다음과 같은 조건을 가진 것으로 가정한다.

- (1) 모든 스위치 소자의 특성은 이상적인 것으로 가정한다.
- (2) MOSFET 및 다이오드의 순바이어스 저항은 0이고 역바이어스 저항은 ∞ 로 가정한다.
- (3) 인버터 입력전압 V_i 는 리플 성분이 거의 없는 것으로 가정한다.

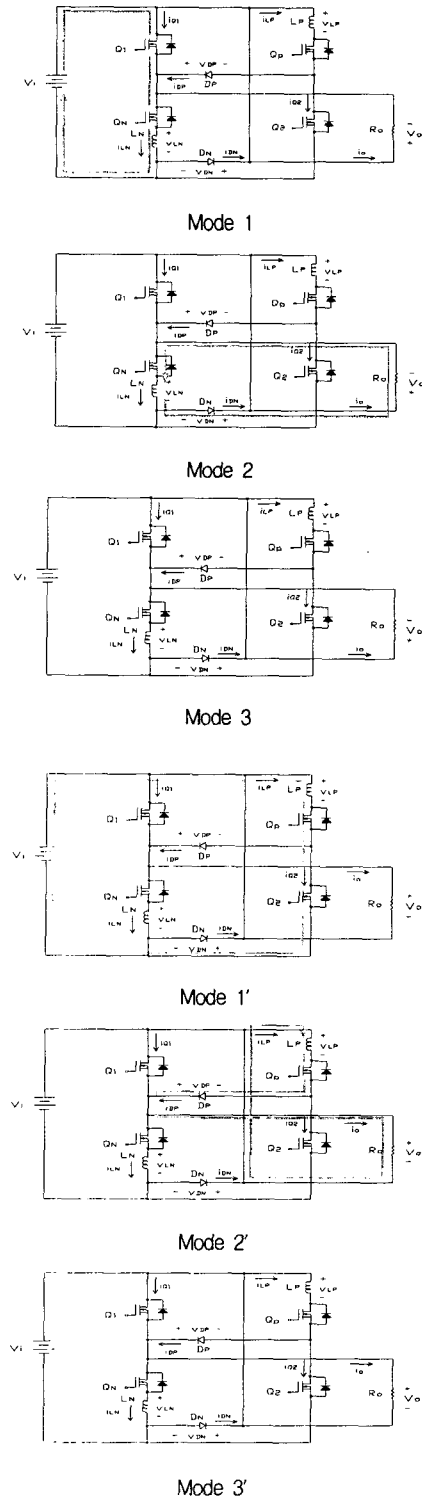


그림 3 스위칭 상태에 따른 등가회로도
 Fig. 3 Equivalent circuit according to switching state

- (4) 인버터 부하 Z_o 는 오직 순수 저항 성분만을 가지는 것으로 가정한다.

제안하는 전류원형 PWM 인버터는 그림 3에서 보는 바와 같이 정극성 출력구간 및 역극성 출력구간 각각에 대하여 3가지의 모드로 동작된다.

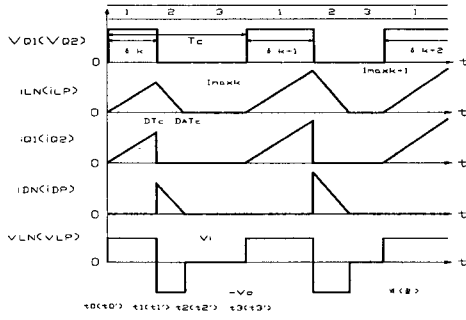


그림 4 스위칭 상태별 인버터 각 부 파형
Fig. 4 Waveforms of inverter current and voltage according to switching state

Mode 1($t_0 \sim t_1$) : Q_N 과 Q_1 이 on 되게 되면 인덕터 전압 v_{LN} 은 입력전압 V_i 와 같게 되며 D_N 이 역바이어스 상태가 되면서 입력전압 V_i 에 의해 인덕터 전류 i_{LN} 이 선형적으로 증가하게 된다.

$$v_{LN} = V_i \quad (1)$$

$$\frac{di_{LN}}{dt} = \frac{V_i}{L_N} \quad (2)$$

$$i_{LN}(t) = \frac{1}{L_N} \int_{t_0}^t V_i dt \quad (3)$$

여기서, i_{LN} 이 최대가 되는 시점은 $t = t_1$ 이 되는 시점이 되므로 Mode 1 구간에서의 최대 인덕터 전류 I_{LNmax} 는 다음의 식에서와 같이 된다.

$$\begin{aligned} I_{LNmax} &= \frac{1}{L_N} \int_{t_0}^{t_1} V_i dt \\ &= \frac{V_i}{L_N} \cdot (t_1 - t_0) \end{aligned} \quad (4)$$

$t_0 \sim t_1$ 구간 동안, i_{LN} 은 선형적으로 증가하게 되므로 i_{LN} 의 평균 인덕터 전류는 $I_{LNmax}/2$ 가 되고 인덕터 L_N 에 저장되어지는 평균 입력전력 P_{iN} 은 다음의 식에서와 같이 된다.

$$P_{iN} = V_i \cdot \frac{I_{LNmax}}{2} \cdot (t_1 - t_0) \quad (5)$$

여기서, P_{iN} : 역극성 구간에서의 평균 입력전력

Mode 2($t_1 \sim t_2$) : Q_N 이 on 된 상태에서 Q_1 이 off 되게 되면 인덕터 전압 v_{LN} 의 극성이 전환되어지고 D_N 이 순바이어스 상태가 되면서 L_N 에 저장되었던 에너지가 부하 Z_o 측으로 공급 된다.

$$v_{LN} = -V_o \quad (6)$$

$$\frac{di_{LN}}{dt} = \frac{-V_o}{L_N} \quad (7)$$

$$i_{LN}(t) = \frac{1}{L_N} \int_{t_1}^t (-V_o) dt \quad (8)$$

여기서, i_{LN} 이 최소가 되는 시점은 $t = t_2$ 가 되는 시점이 되므로 Mode 2 구간에서의 최소 인덕터 전류 I_{LNmin} 은 다음의 식에서와 같이 된다.

$$\begin{aligned} I_{LNmin} &= \frac{1}{L_N} \int_{t_1}^{t_2} (-V_o) dt \\ &= \frac{(-V_o)}{L_N} \cdot (t_2 - t_1) \end{aligned} \quad (9)$$

$t_1 \sim t_2$ 구간 동안, i_{LN} 은 선형적으로 감소하게 되므로 i_{LN} 의 평균 인덕터 전류는 $I_{LNmax}/2$ 가 되고 인덕터 L_N 에서 부하 Z_o 측으로 방전되어지는 평균 출력전력 P_{oN} 은 다음의 식에서와 같이 된다.

$$P_{oN} = V_o \cdot \frac{I_{LNmax}}{2} \cdot (t_2 - t_1) \quad (10)$$

여기서, P_{oN} : 역극성 구간에서의 평균 출력전력

인버터 효율이 100%라고 가정할 시, 입력 측에서 유입되는 에너지 P_{iN} 과 출력 측으로 공급되는 에너지 P_{oN} 은 같으므로 결국, 식 (5)와 식 (10)으로부터 역극성 구간의 스위칭 한 주기동안에 대한 인버터 전압 전달비 G_{VN} 을 다음의 식에서와 같이 얻어낼 수 있다.

$$G_{VN} \equiv \frac{v_o}{V_i} = \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_1} \quad (11)$$

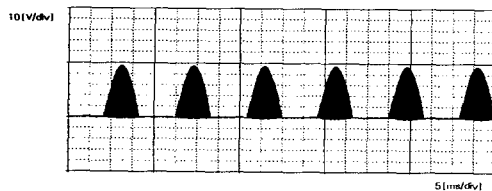
Mode 3($t_2 \sim t_3$) : Q_N 이 on 그리고 Q_1 이 off 를 유지한 상태에서, L_N 에 저장되었던 모든 에너지가 부하 Z_o 측으로 전달 되게 되면 D_N 이 다시 off 되게 되며 결국, i_{LN} 이 0이 되는 구간 즉, 전류 불연속 모드 구간이 존재하게 된다.

3. 시뮬레이션

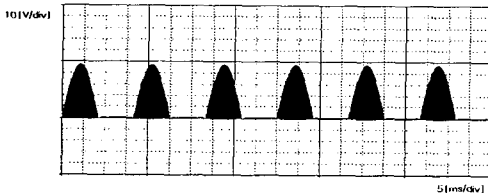
본 논문에서 제안한 Buck-Boost 전류원형 PWM 인버터에 대한 하드웨어 구현의 타당성을 검증하기 위하여 P-SPICE에 의한 시뮬레이션을 실시하였다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

스위칭 주파수(f_c)	10kHz
태양전지 전압(V_i)	50VDC
인덕터(L_N, L_P)	300 μ H
필터용 인덕터(L_f)	1mH
필터용 콘덴서(C_{f1}, C_{f2})	2 μ F
부하저항(R_o)	80 Ω
최대 통류율(δ_{max})	0.6



a) i_{LN}



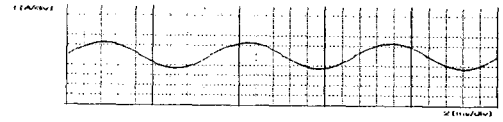
b) i_{LP}

그림 5 인덕터 L_P, L_N, L_f 전류 시뮬레이션 파형
Fig. 5 Simulation waveforms of current in L_P, L_N, L_f

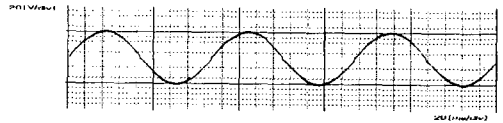
그림 5에는 gate 신호에 의해 만들어진 i_{LN} , 및 i_{LP} 파형이 나와 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각 인덕터부에 흐르는 전류가 불연속적인 형태를 띠고 있다.

제안하는 바와 같이 이들 인덕터 전류는 계통전압의 궤환신호인 기준신호 v_r 에 따라 불연속적으로 흐르게 되므로 인버터 출력전류 i_o 와 계통전압 v_s 간에 위상차가 발생되지 않을 것임을 예측할 수 있다. 그림 6에는 인버터 출력전류 i_o , 인버터 출력전압 v_o 및 계통전압 v_s 에 대한 시뮬레이션 결과 파형들이 나와 있다. 그림에서 보는바와 같이 인버터 출력전류 i_o 는 계통전압 v_s 에 대하여 역률 1로 출력되고 있다.

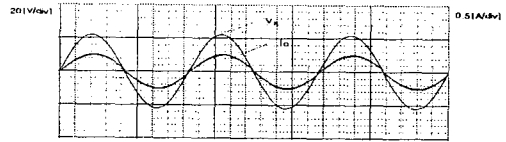
그림 7는 인버터 출력전류 i_o 에 대한 주파수 스펙트럼으로서 i_o 에 포함된 전고조파 성분은 거의 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 실제 시스템을 사용한 계통 연계 시에도, 인버터 출력전력과 계통 전력 간에 상지연이 발생되지 않고 역률 1을 유지하면서 부하 측에 안정적인 전력이 공급될 것임을 예측할 수 있다.



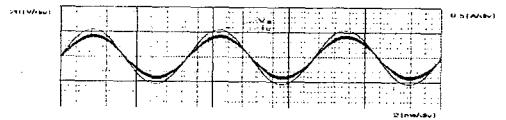
a) i_o



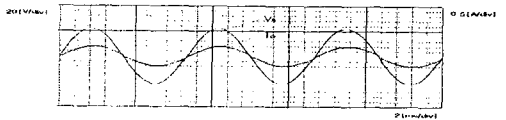
b) v_o



c) v_s, i_o (Where, $R_o : 80\Omega$)



d) v_s, i_o (Where, $R_o : 30\Omega$)



e) v_s, i_o (Where, $R_o : 30\Omega$)

그림 6 인버터 출력 및 계통전압 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation waveforms of signal, inverter output current i_o , output voltage v_o , utility line voltage v_s

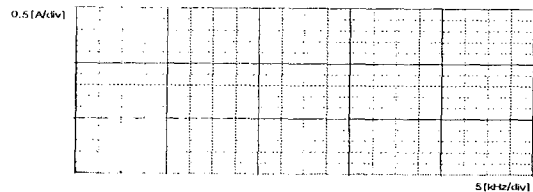


그림 7 인버터 출력 전류 시뮬레이션 파형에 대한 주파수 스펙트럼

Fig. 7 Frequency spectrum of inverter output current waveforms (simulation)

4. 실험 결과

표 2에서와 같은 설계사양을 가정하여 설계를 수행하고 설계된 인버터의 동작 특성을 실험을 통하여 확인하였다.

한편 본 실험에서 사용된 PV 파라미터는 표 3에서와 같으며, PV Module을 직렬로 3개 연결하여 실험을 실시하였다.

표 2 인버터 설계 사양
Table 2 Design specification of inverter

정격 입력전압(V_i)	52.2	[VDC]
스위칭 주파수(f_c)	10	[kHz]
인덕터(L_N, L_P)	300	[μ H]
필터용 인덕터(L_f)	1	[mH]
필터용 콘덴서(C_{f1}, C_{f2})	2.2	[μ F]
최대 통류율(δ_{max})	0.6	-
정격 출력전압(V_o)	110	[VAC]
정격 출력주파수	60	[Hz]
정격 출력전류	1.4	[A]
정격 출력용량	150	[VA]

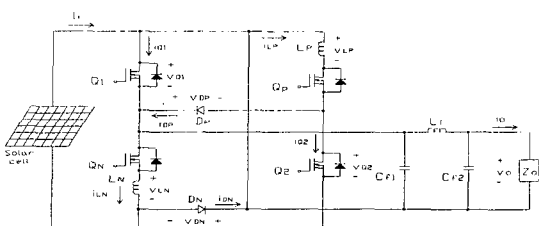
표 3 PV Module 파라미터
Table 3 PV Module parameters

개방전압	21.7	[V]
단락전류	3.32	[A]
정격전압	17.4	[V]
정격전류	3.05	[A]
정격전력용량	50	[Wp]

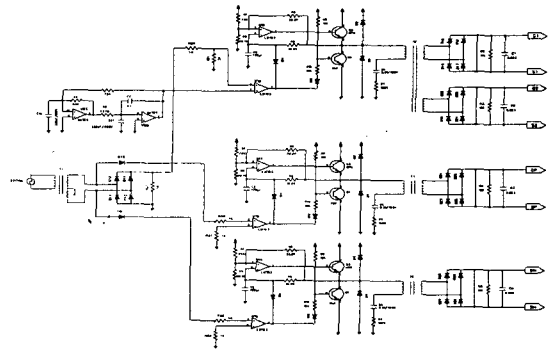
그림 8(a)는 제안하는 인버터에 대한 정격 150W 급 실험 회로도이며 PV, 4개의 MOSFET, 2개의 FR(Fast Recovery) Diode, LC 필터 및 부하로 구성하였다. 그림 8(b)는 인버터 각 스위치 단에 공급될 Gate pulse 회로로서 analog 방식으로 회로를 구성하였다.

그림 9는 인버터의 출력전류 i_o 에 대한 실험 파형으로 계통전압 v_s 에 대하여 위상 지연이 없는 역률 1의 출력파형을 보여주고 있다

그림 10은 인버터 출력전류 i_o 의 실험 결과 파형에 대한 주파수 스펙트럼으로서 시뮬레이션 결과 파형에서와 마찬가지로 출력전류 i_o 에는 60Hz의 기본파 성분만이 나타나고 있음을 알 수 있다.



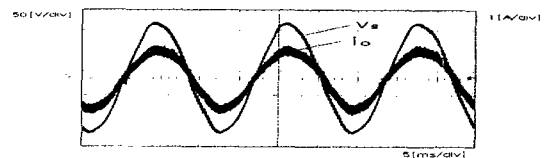
(a) 주 전력회로도
(a) Main power circuit



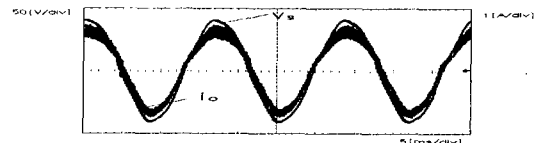
(b) Q_P, Q_N, Q_1, Q_2 gate drive 회로
(b) Q_P, Q_N, Q_1, Q_2 gate drive circuit

그림 8 Buck-Boost 전류원형 PWM 인버터에 대한 실험 회로도

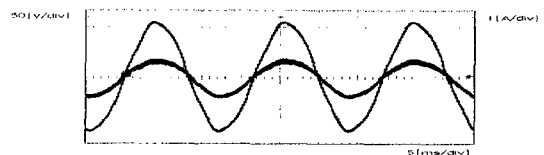
Fig. 8 Experimental circuit for Buck-Boost Current-Source PWM inverter



a) v_s & i_o ($R_0 = 80 \Omega$)



b) v_s & i_o ($R_0 = 30 \Omega$)



c) v_s & i_o ($R_0 = 130 \Omega$)

그림 9 Experimental waveforms of utility line voltage v_s and inverter output current i_o

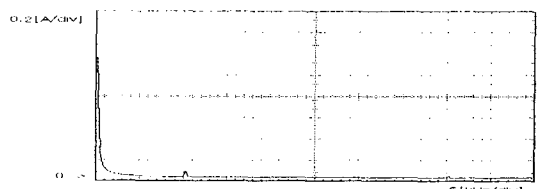


그림 10 i_o 실험파형에 대한 주파수 스펙트럼
Fig. 10 Frequency spectrum of current i_o (Experiment)

5. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 태양광 발전시스템에 적용하기 위한 인터페이스 회로로서, 2개의 Buck-Boost Topology를 조합시킨 Buck-Boost 전류원형 PWM 인버터를 제안하였다. 인버터 입력전류를 계통전압의 궤환신호에 따라 불연속적으로 동작시키고 캐리어주파수에 의한 고조파 성분은 출력단 필터를 통해 제거 시키게 되면 복잡한 입력전류 제어를 사용하지 않고서도 회로가 고역율로 동작되어질 수 있음을 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였다. 이와 더불어 제안하는 인버터는 입력전압에 대한 승강압이 가능하므로 태양전지 발전전압 보다 높은 실효치의 교류출력을 얻어낼 수 있으며 부하에서 요구하는 전류가 변동되더라도 지속적으로 계통전압과 동상을 유지하면서 역률 1의 출력전류를 부하 측에 공급해 줄 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 인버터를 계통 연계형 태양광 발전시스템의 인터페이스 회로로 적용할 시, 계통전압의 순시전압 변동 및 주파수 변동 등을 발생시키지 않으면서 태양광 발전 전력을 부하 측으로 안정적으로 공급해 줄 수 있게 된다.

참 고 문 헌

- [1] Electric Power Research institute, AP-3351 : Photovoltaic Power Systems Research Evaluation : A Report of the EPRI Ad Hoc Photovoltaic Advisory committee Unlimited, EPRI, Paio Alto, CA, 1983.
- [2] U.S. Department of Energy, National Photovoltaic Program : Five Year Research Plan, 1987-1991, U.S. DOE, Washington DC, 1987.
- [3] Michihiko Nagao, and Koosuke Harada, "Power Flow of Photovoltaic System using Buck-Boost PWM power Inverter", *IEEE/PEDS*, pp. 144-149, 1997.
- [4] Johanna M. A. Myrzlk, "Novel Inverter Topologies for Single-Phase Stand-Alone or Grid-Connected Photovoltaic System", *IEEE/PEDS*, pp. 103-108, 2001.
- [5] B. K. Bose et al, "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System", *IEEE Trans. On Industry Application*, IA-215, pp. 1182-1191, 1985.
- [6] H. Watanable et al, "A Novel Unity Interactive Photovoltaic Inverter", *IEEE/IECON'98*, Vol. 2, pp. 721-725, 1998.
- [7] S. Nonaka, "A Novel Three-Phase Sinusoidal PWM Voltage Source Inverter and its Application for Photovoltaic Power Generation System", *IEEE/PCC '97*, pp. 755-761, 1997.
- [8] G. Keller et al, "Module Orientated Photovoltaic

Inverters A Comparison of Different Circuits", *IEEE/WCPEC '94*, pp. 929-932, 1994.

- [9] Jai P. Agrawal, "Power Electronic Systems Theory and Design", Prentice Hall, pp. 219-257, 2001.