Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 17, No.5, pp. 36~42 September 2003 논문 17-5-6

Buck-Boost 형태의 전류형 PWM 인버터를 이용한 태양광 발전과 계통연계에 관한 연구

(A Study of Interface between Photovoltaic System and Utility Line using a Current-Source PWM Inverter based on Buck-boost topology)

주성용* · 양근령 · 강필순 · 김철우
(Sung-Yong Joo · Geun-Ryoung Yang · Feel-Soon Kang · Cheul-U Kim)

요 약

본 논문에서는 태양광 발전과 계통 연계를 위한 인터페이스 회로로서 Buck-Boost 형태에 기초한 전류형 PWM 인버터를 제안한다. 제안된 전류형 PWM 인버터는 두 개의 Buck-Boost 토폴로지를 조합하여 구성하였으며, 입력단의 인덕터 전류를 전류 불연속 모드로 동작시켜 별도의 입력 전류의 검출 없이도 출력단을 단위 역률화 할 수 있도록 구성하였다. 결과적으로 전체 시스템의 간략화가 가능하며, 특히, 부가적인 승압 장치 없이 태양전지 발전 전압 보다 높은 실효치의 교류 출력을 얻을 수 있는 장점을 가진다. 제안하는 인버터에 대한 동작을 이론적으로 분석하고 하드웨어 구현의 타당성을 검증하기 위하여 시제품을 제작하고 실험하였다.

Abstract

This paper presents a new current-source PWM inverter based on Buck-boost configuration to interface between photovoltaic system and utility line. Proposed inverter is consisted by two set of buck-boost topology, and the input inductor is designed to be operated on the discontinuous current conduction mode. So high power factor can be achieved without additional input current controller. As a result, overall system has simple structure, and it can obtain higher ac output rms voltage than the terminal voltage of the photovoltaic systerr without additional boosting procedure. The operational modes are theoretically analyzed, and then the validity of the proposed system was verified through simulation and experimental results using a prototype.

Key Words : Current-Source PWM inverter, Buck-Boost topology

1. 서 론

새로운 에너지원으로서 태양광 발전은 무한한 태양에너지를 이용한다는 점과 청정에너지라는 관점에서 상당한 각광을 받으며, 현재에도 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히, 태양전지의 DC 출력을 AC 계통과 연계하기 위해서는 인터페이스 회로인 인버터로 이루어지는 태양광 발전 시스템이 요구된다. 최근 제조원가를 줄이거나 효율개선을 통하여 실용화 시기를 앞당기기 위한 노력을 기울이고 있고, 이와 병행하여 인버터 등 주변 장치의 저가화 및 고효

* 주저자 : 부산대학교 전기공학과 석사과정
Tel : 051-510-1488 FAX : 051-513-0212
E-mail : sungyong@pusan.ac.kr
접수일자 : 2003년 4월 21일
1차심사 : 2003년 5월 6일
심사완료 : 2030년 6월 9일

율화에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]-[2].

본 논문에서는 비교적 효율이 높으면서도 전반적인 시스템 가격을 경감시킬 수 있는 태양광 발전 시스템용 인터페이스 회로로서 전류 불연속 모드로 동작하는 2개의 Buck-Boost 토폴로지를 조합한 전류형 PWM 인버터를 제안한다. 제안하는 인버터 회로는 4개의 MOSFET 스위치와 2개의 FR(Fast recovery) 다이오드, 2개의 인덕터 및 LC 필터로 구성된 full-bridge형태의 회로로서 직류입력 전력의 맥동에 의한 출력전력의 왜형을 방지하기 위하여 전류불연속 모드로 동작되어 진다[3]. 따라서 복잡한 입력전류 제어기 없이도 회로가 고역률로 동작될 수 있으며, 이로 인해 회로가 매우 간단한 구조가 될 수 있다. 또한 매 반주기 마다 쵸핑을 위한 스위치1개와 극성 전환을 위한 스위치 1개만이 사용되어지므로 스위치에 의한 손실이 작다. 이와 더불어 제안하는 인버터는 출력단 측의 승압 필요시, 부가적인 승압 장치 없이도 태양전지 발전전압보다 높은 실효치의 교류출력을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다[4]-[8]. 본 논문에서는 제안하는 인버터 회로의 각 모드별 동작 특성 및 입·출력 특성에 관하여 이론적인 분석을 시행하였으며 PSpice를 이용하여 회로의 동작특성에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. 그리고 하드웨어 구현의 타당성을 검증하기 위하여 Prototype을 제작하고 실험 하였다.

2. 시스템 구성

2.1 제안하는 인버터의 구성과 동작

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

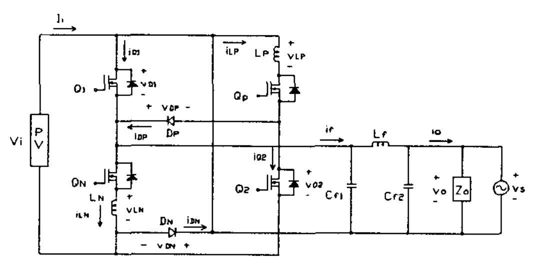


그림 1. Buck-Boost 전류원형 PWM 인버터 회로구성도
Fig. 1. Circuit configuration of Buck-Boost current-source PWM inverter

그림 2에는 게이트 신호 V_{Q1}, V_{Q2}, V_{QP}, V_{QN}, 인덕터 전류 i_{LP}, i_{LN}, i_f 및 출력전류 i_o에 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_r에 따라 불연속적으로 흐르게 함으로서 출력전류 i_o가 계통전압 v_S를 추종하도록 하며 스위칭 주파수 fc에 의한 전류리플 성분은 인버터 출력단 측의 LC 저역 통과 필터를 사용하여 제거함으로서 회로에 대한 역률 개선 및 회로손실의 최소화를 실현한다.

PWM 제어용으로 사용되어지는 기준 신호 v_r은 계통전압 v_S로부터 검출한 신호를 사용하게되고 이 기준신호에 따라 인덕터 전류가 불연속적으로 흐르게 되므로 복잡한 입력 전류센서 없이도 출력전압 V_o와 동상을 이루는 정현적인 출력전류 i_o가 얻어 질 수 있으며 결국 인버터 회로가 매우 높은 역율을 가질 수 있게 된다.

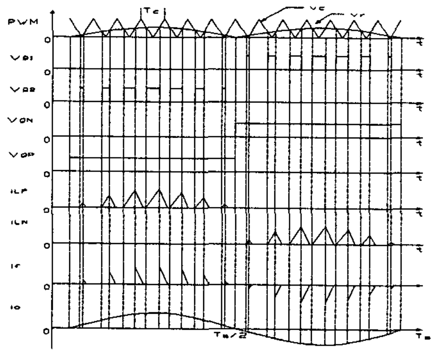


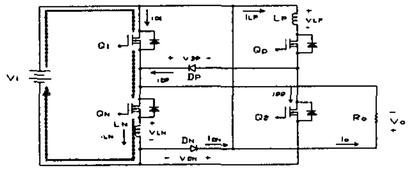
그림 2. Buck-Boost 전류원형 PWM 인버터의 각 부 파형
Fig. 2. Waveforms of Buck-Boost current-source PWM inverter

제안하는 인버터에 대한 스위칭 펄스의 형태를 살펴 보면, v_r의 첫번째 반 사이클 동안에는 Q_2에 PWM 파가 그리고 Q_P에 구형파가 인가되며 기준 신호 v_r의 두번째 반 사이클 동안에는 Q_1에 PWM 파가 그리고 Q_N에 구형파가 인가되어짐을 알 수 있다. 이러한 스위치 구조에서 정극성의 출력전압을 발생시킬 때에는 Q_P와 Q_2 만이 사용되어지고 역극성의 출력전압을 발생시킬 시때에는 Q_N과 Q_1 만이 사용되어지게 되므로 회로 동작 중의 스위칭 손실이 작게 됨을 알 수 있다.

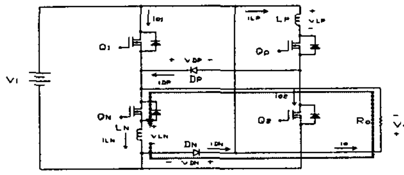
2.2 인버터 동작모드 분석

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

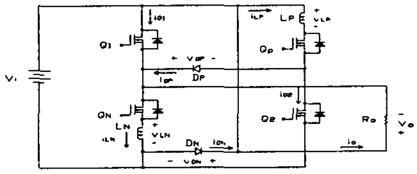
(1) 모든 스위치 소자의 특성은 이상적인 것으로



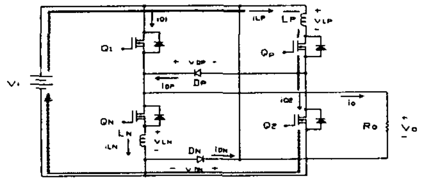
Mode 1



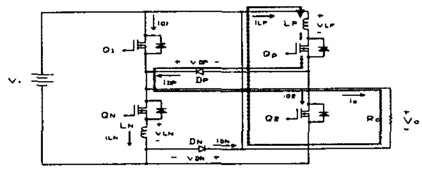
Mode 2



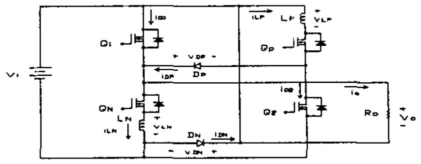
Mode 3



Mode 1′



Mode 2′



Mode 3′

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

가정 한다.

(2) MOSFET 및 다이오드의 순바이어스 저항은 0이고 역바이어스 저항은 ∞로 가정한다.
(3) 인버터 입력전압 V_i는 리플 성분이 거의 없는 것으로 가정한다.
(4) 인버터 부하 Z_o는 오직 순수 저항 성분만을 가지는것으로 가정한다.
(5) 회로는 정상상태에서 동작한다.

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

Mode 1(t_0~t_1) : Q_N과 Q_1이 on 되게 되면 인덕터 전압 V_{LN}은 입력전압 V_i와 같게 되며 D_N이 역바이어스 상태가 되면서 입력전압 V_i에 의해 인덕터 전류 i_{LN}이 선형적으로 증가하게 된다.

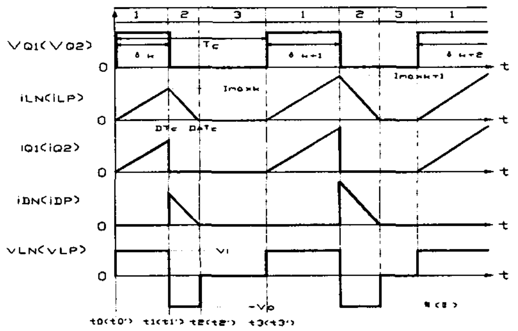


그림 4. 스위칭 상태별 인버터 각 부 파형
Fig. 4. Waveforms of inverter current and voltage according to switching state

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

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

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

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_N에 저장되어지는 평균 입력전력 P_{iN}은 다음의 식에서와 같이 된다.

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

여기서, P_{iN} : 역극성 구간에서의 평균 입력전력

Mode 2($t_1 \sim t_2$) : Q_N이 on 된 상태에서 Q_1이 off 되게 되면 인덕터 전압 V_{LN}의 극성이 전환되어지고 D_N이 순바이어스 상태가 되면서 L_N에 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 식과 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_N에서 부하 Z_o 측으로 방전되어지는 평균 출력전력 P_{oN}은 다음의 식에서와 같이 된다.

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

여기서, P_{oN} : 역극성 구간에서의 평균 출력전력

인버터 효율이 100%라고 가정할 때, 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.

$$G_{VN} \equiv \frac{V_o}{V_i} = \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_1} \quad (2.11)$$

Mode 3($t_2 \sim t_3$) : Q_N이 on 그리고 Q_1이 off 를 유지한 상태에서, L_N에 저장되었던 모든 에너지가 부하 R_o 측으로 전달 되게 되면 D_N이 다시 off 되게 되며 결국, i_{LN}이 0이 되는 구간 즉, 전류 불연속 모드 구간이 존재하게 된다.

3. 시뮬레이션

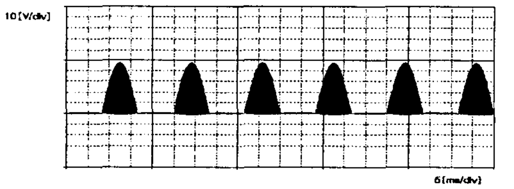
본 논문에서 제안한 Buck-Boost 전류원형 PWM 인버터에 대한 하드웨어 구현의 타당성을 검증하기 위하여 PSpice에 의한 시뮬레이션을 실시하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

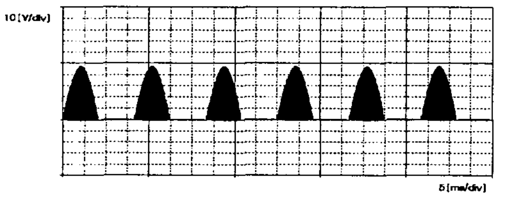
스위칭 주파수(f_c)	10[kHz]
태양전지 전압(V_i)	50[VDC]
인덕터(L_N, L_P)	300[uH]
필터용 인덕터(L_f)	1[mH]
필터용 콘덴서(C_{f1}, C_{f2})	2[uF]
부하저항(R_o)	80[Ω]
최대 통류율(δ_{max})	0.6

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 나타내고 있다.

제안하는 바와 같이 이들 인덕터 전류는 계통전압의 궤환신호인 기준신호 vr에 따라 불연속적으로 흐르게 되므로 인버터 출력전류 io와 계통전압 vs 간에 위상차가 발생되지 않을 것임을 예측할 수 있다.



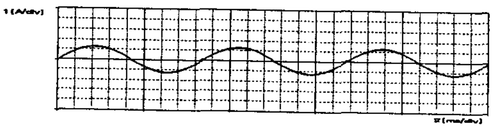
a) iLN



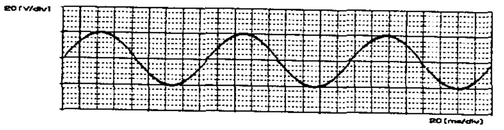
b) iLP

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

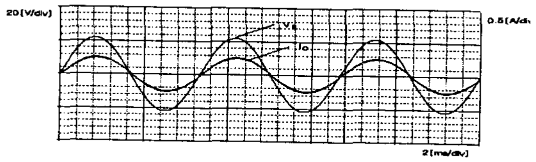
그림 6에는 인버터 출력전류 i_o, 인버터 출력전압 V_o 및 계통전압 V_s에 대한 시뮬레이션 결과 파형들이 나와 있다. 그림에서 보는 바와 같이 인버터 출력전류 i_o는 계통전압 V_s에 대하여 역률 1로 출력되고 있다.



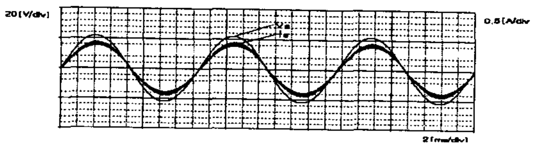
a) i_o



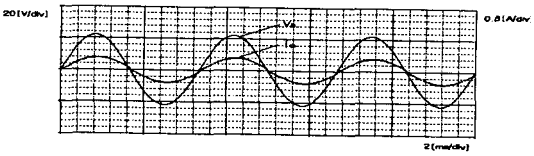
b) v_o



c) v_s, i_o(Where, R_o : 80[Ω])



d) vs, io(Where, Ro : 30[Ω])



e) v_s, i_o(Where, R_o : 30[Ω])

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

4. 실험 결과

표 2에서와 같이 제안한 인버터는 소형 가전제품 약 2대를 운용할 수 있도록 가정하여 설계를 수행하고 설계된 인버터의 동작 특성을 실험을 통하여 확인하였다.

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	[uH]
필터용 인덕터(L_f)	1	[mH]
필터용 콘덴서(C_{f1}, C_{f2})	2.2	[uF]
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]

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

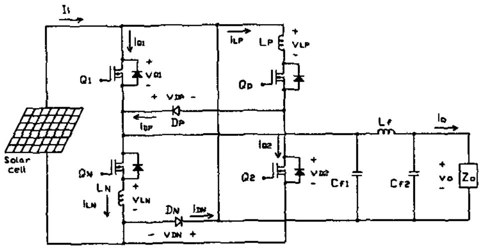
표 3. PV Module 파라미터
Table 3. PV Module parameters

개 방 전 압	21.7	[V]
단 락 전 류	3.32	[A]
정 격 전 압	17.4	[V]
정 격 전 류	3.05	[A]
정 격 전 력 용 량	50	[Wp]

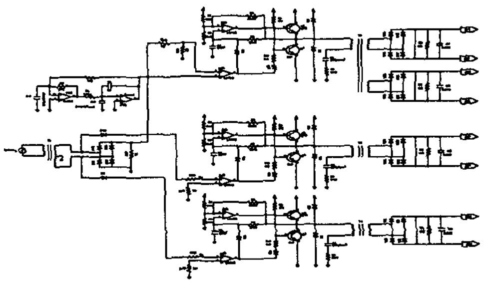
그림 7 a)는 제안하는 인버터에 대한 정격 150W급 실험 회로도이며 PV, 4개의 MOSFET, 2개의 FR(Fast Recovery) Diode, LC 필터 및 부하로 구성하였다. 그림 7 b)는 인버터 각 스위치 단에 공급될 Gate pulse 회로로서 analog 방식의 회로를 구성하였다.

그림 8은 인버터의 출력전류 i_o에 대한 실험 파형으로서 계통전압 v_s를 인버터의 기준신호로 사용하여 전류를 불연속적으로 제어하기 때문에 부하조건(R, L)에 상관없이 인버터 출력전류는 항상 계통전압과 동상을 유지하게 되며 역률 1의 출력파형을 나타나게 할 수 있는 것이다.

그림 9는 인버터 출력전류 i_o의 실험 결과 파형에 대한 주파수 스펙트럼으로서 시뮬레이션 결과 파형에서와 마찬가지로 출력전류 i_o에는 60[Hz]의 기본파 성분만이 나타나고 있음을 알 수 있다.

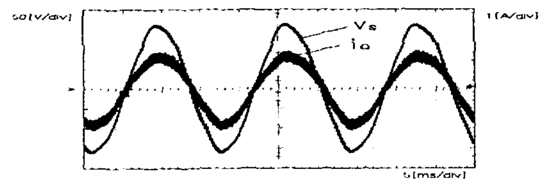


a) 주 전력회로도
a) Main power circuit

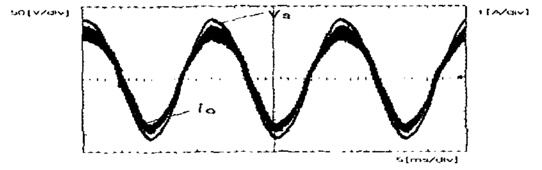


b) Q_P, Q_N Q_1, Q_2 gate drive 회로
b) Q_P, Q_N Q_1, Q_2 gate drive circuit

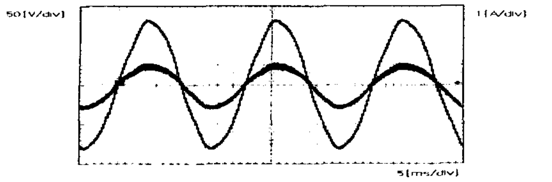
그림 7. Buck-Boost 전류원형 PWM 인버터에 대한 실험 회로도
Fig. 7. Experimental circuit for Buck-Boost Current-Source PWM inverter



a) vs & i_o(R_o = 80[Ω])



b) vs & i_o(R_o = 30[Ω])



c) vs & io(Ro = 130[Ω])

그림 8. 인버터 출력전류 i_o 및 계통전압 v_s 실험파형
Fig. 8. Experimental waveforms of utility line voltage v_s and inverter output current i_o

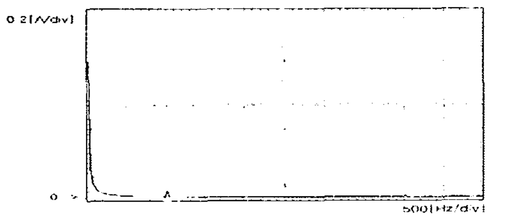


그림 9. i_o 실험파형에 대한 주파수 스펙트럼
Fig. 9. Frequency spectrum of current i_o (Experiment)

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 제어기를 사용하지 않고서도 회로 고역율로 동작되어질 수 있음을 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였다. 이와 더불어 제안하는 인버터는 입력전압에 대한 승·강압이 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 적용 한다면 계통전압의 순시전압 변동 및 주파수 변동 등을 발생시키지 않으면서 태양광 발전 전력을 부하 측으로 안정적으로 공급해 줄 수 있을 것이라 생각된다.

"본 연구는 부산대학교 학술연구 조성비(4년과제)에 의한 연구임"

References

[1] France Lasnier and Tony Gan Ang, Photovoltaic Engineering Handbook, Adam Hilger, 1990.
[2] Michihiko Nagao, and Koosuke Harada, "Power Flow of Photovoltaic System using Buck-Boost PWM Power Inverter", IEEE PEDS, pp.1182-1191, 1985.
[3] Johanna M. A. Myrzlk, "Novel Inverter Topologys for Single-PhaseStand-Alone or Grid-Connected Photovoltaic Power Conditioning System", IEEE Transactions on Industry Application, IA-215, pp.1182-1191, 1985.
[4] B. k. Bose et al, "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioing System", IEEE Transactions on Industry Application, IA-215, pp.1182-1191, 1985.
[5] H. Watanable et al, "A Novel Unity Interactive Photovoltaic Inverter", IEEE IECON, Vol.2, pp.721-725, 1998.
[6] S. Nonaka, "A Novel Three-phase Sinusoidal PWM Voltage Source Inverter and its Application for Photovoltaic Power Generation System", IEEE PCC, pp.755-761, 1997.
[7] G. Keller et al, "Module Orientated Photovoltaic Inverter A Comparison of Different Circuits", IEEE WCPEC, pp.929-932, 1944.
[8] Jai P. Agrawal, "Power Electronic System Theory and Design", Prentice Hall, pp.219-257, 2001.

◇저자소개◇

주성용 (周成勇)
1976년 1월 29일생. 2002년 동아대 공대 전기공학과 졸업(학사). 현재 부산대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

양근령 (梁根領)
1969년 8월 11일생. 1993년 동신대 공대 전자공학과 졸업(학사). 2002년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 세방하이테크(주) 기술연구소 주임연구원.

강필순 (姜弼淳)
1973년 9월 5일생. 1998년 경상대 공대 전기공학과 졸업(학사). 2000년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 2월 동 대학원 졸업(박사).

김철우 (金喆禹)
1942년 12월 5일생. 1969년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대학 전자공학과 졸업(석사). 1981년 일본 동경 공업대 전기전자공학과 객원교수. 1986 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 부산대 공대 전자전기통신공학부 교수.