

전류형 인버터를 이용한 계통 연계형 태양광 발전 시스템에 관한 연구

임정민*, 박성준**, 이상훈***, 문채주*, 최준호**

목포대학교 전기공학과*, 전남대학교 전기공학과**, 부산대학교 메카트로닉스협동과정***

Study on Grid-Connected Photovoltaic System using Current-Source Inverter

J.M. Lim* · S.J. Park** · S.H. Lee*** · C.J. Moon* · J.H. Choi**

Mokpo National University*, Chonnam National University**, Pusan National University***

ABSTRACT

This Paper presents a 6 pulse shift operation control mode of current-source-inverter to make improvement of efficiency and to reduce the frequency of inverter switching for photovoltaic generation system using PWM current-source-inverter. This system is connected solar cell energy directly without using a storage cell. The proposed circuit can maintain maximum voltage of photovoltaic generation ot take advantage of six Buck-Boost converter and a full-bridge inverter determines the polarity of AC output. That is controlled by using digital signal processor TMS320F2812 for operation about a 6 pulse shift operation control of current-source-inverter, and it is verified through the experimental results.

1. 서 론

최근 화력 및 원자력 발전에 대한 환경 및 안정성 등의 문제가 대두되면서 대체 에너지에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다^{[1],[2],[3]}. 그 중에서도 태양광 발전은 무한하고 청정에너지라는 관점에서 상당한 각광을 받으며, 현재에도 많은 연구가 이루어지고 있다. 태양광 발전 시스템의 구성은 크게 태양전지 모듈, 축전지, 인버터 부분으로 구성되어 있다. 이러한 태양광 발전 시스템의 전기에너지를 저장하기 위해서는 축전지가 필수적이다. 이러한 축전지의 구비는 경제적인 문제와 함께 축전지의 수명 및 환경에 대한 무제를 앓고 있다. 축전지의 문제를 해결할 수 있는 방법은 발생하는 태양에너지를 저장 장치 없이 직접 적원 측으로 전달하는 것이다^[4]. 이러한 시스템에서 중요한 부분을 차지하는 것은 태양전지의 DC 출력을 AC 계통과 연계하기 위한 인터페이스 회로인 인버터이다. 특히 전류형 인버터는 계통 연계 시 인버터의 출력 전압이 계통 전압보다 낮아도 무관하며, 부

하단락 및 인버터 사고가 발생할 때 단락에 대한 돌입전류가 없다는 장점을 가진다^{[2],[3]}. 이러한 전류형 인버터를 사용하여 우수한 특성을 갖는 태양광 발전 시스템을 구성할 때 일반적으로 프로세서를 사용한 제어를 사용한다. 제어기에서 인덕턴스의 크기와 출력 전류의 리플을 줄이기 위해서는 높은 스위칭 주파수가 요구되나 인버터의 스위칭 주파수는 스위칭 손실과 프로세서의 성능에 따른 샘플링 주파수에 의해 제한되는 경우가 많이 발생한다.

본 논문에서는 전류형 PWM 인버터로 구동되는 태양광 발전 시스템에서 스위칭 주파수를 줄이고 효율을 개선하기 위하여 인버터의 6-pulse-shift 구동방식을 제안하고, 태양 전지 모듈에서 발생하는 전기에너지를 충전하지 않고 전원 측으로 보내주는 태양광 계통 연계 인터페이스 회로로서의 타당성을 실험을 통해 검증하고자 한다. 제안하는 회로는 6개의 전류형 Buck-Boost 컨버터를 기본 토폴로지로 하여 초핑 동작을 하고, 1개의 인버터는 AC 출력단의 정·부 방향을 결정짓는데 이용된다. 그러므로 스위칭에 의한 손실을 저감시킬 수 있는 장점을 가진다. 또한 입력단의 인덕터 전류를 전류 불연속 모드로 동작 시켜 별도의 인력 전류의 검출이 없이도 출력 단을 단위 역률화 할 수 있는 장점을 가진다^{[10]-[12]}. 제안하는 계통 연계형 인버터에 대해 이론적 분석과 DSP(TMS320F2812)를 이용하여 실험 결과로부터 타당성을 검증하였다.

2. 6-pulse-shift 전류형 PWM 인버터

2.1 제안된 전류형 PWM 인버터 회로의 구성

그림 1은 스위칭 주파수를 줄이고 효율을 개선하기 위해 제안된 6-pulse-shift 전류형 PWM 인버터의 회로이다. 전류형 컨버터를 구성함에 있어 태양 전지 모듈의 출력전압이 컨버터의 입력전압보다 높거나 낮은 경우에도 안정된 동작을 하기 위해서 Buck-Boost 컨버터의 사용이 요구된다. 제안하는

회로는 스위치($Q_A \sim Q_F$), 다이오드($D_A \sim D_F$), 인덕터($L_A \sim L_F$)를 사용한 Buck-Boost 컨버터로 구성되었다.

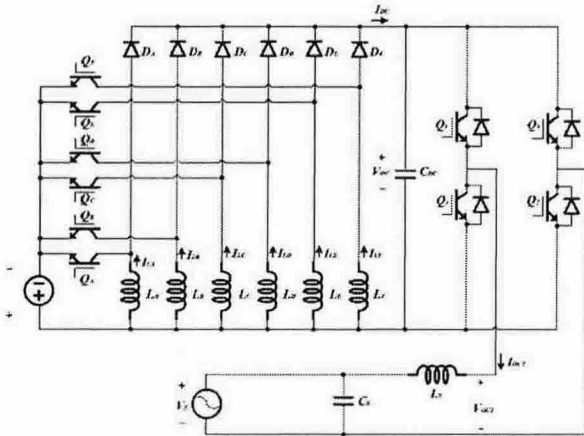


그림 1 제안된 6-pulse-shift 전류형 PWM 인버터
Fig. 1 Proposed 6-pulse-shift current-source PWM inverter

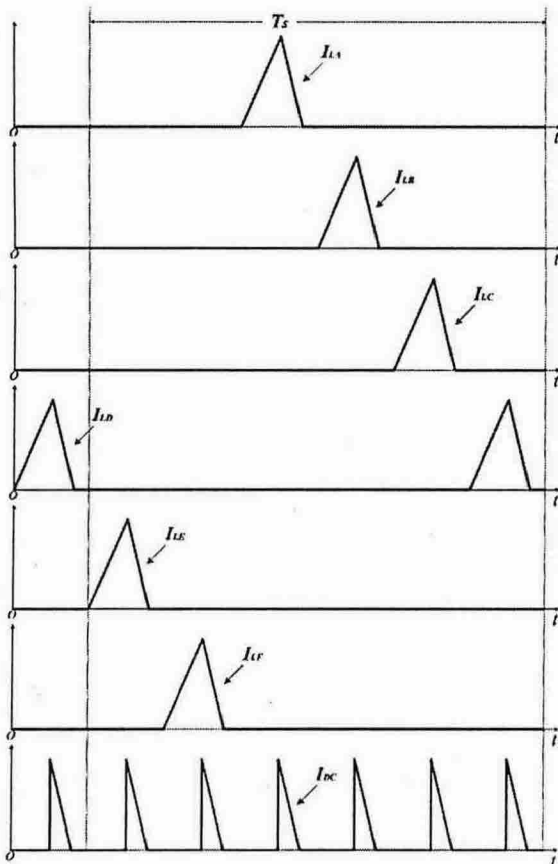
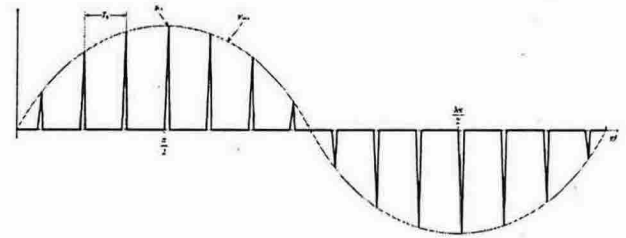


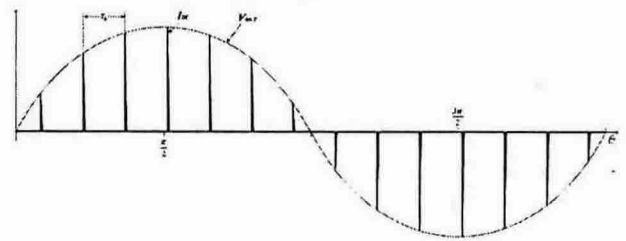
그림 2 제안된 컨버터의 주요 동작 파형
fig. 2 Waveform of proposed current-source PWM inverter

인버터 부분의 스위치($Q_1 \sim Q_4$)는 전원전압과 동

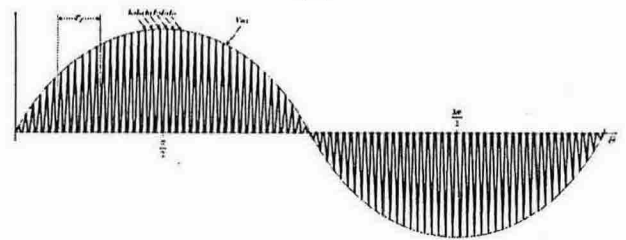
기화되어 출력전압의 극성만을 결정하게 된다. 따라서 인버터의 스위칭 주파수는 전원전압의 주파수인 60[Hz]로 고정되게 된다. 인버터의 출력단의 필터(L_s, C_s)는 출력전류의 파형을 개선하기 위해서 적을 용량을 사용하게 되면, 이 값이 크게 되면 전류의 위상변위로 인하여 전원 측에서 보면 단위역률이 되지 못하는 경우가 발생한다.



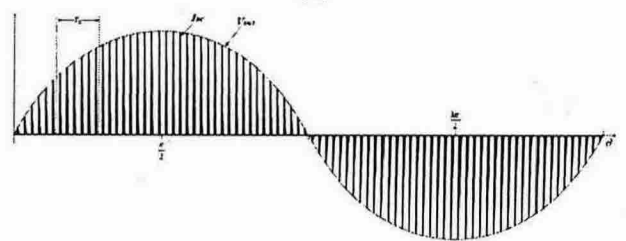
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3 기존의 인버터와 제안된 인버터의 동작파형 비교

- (a) 기존 인버터의 인덕터 전류
- (b) 기존 컨버터의 컨버터 출력 전류
- (c) 제안된 컨버터의 인덕터 전류
- (d) 제안된 컨버터의 출력 전류

Fig. 3 Waveform of proposed and conventional current-source PWM inverter

- (a) Current waveform of conventional inverter
- (b) Output waveform of conventional inverter
- (c) Current waveform of proposed inverter
- (d) Output waveform of proposed inverter

그림 2는 제안된 전류형 PWM 컨버터의 동작과형을 나타내고 있다. 여기서 T_S 는 각 컨버터의 스위칭 주기를 나타낸다. $I_{LA} \sim I_{LF}$ 는 각 컨버터의 인덕터에 흐르는 전류파형을 나타내고 있으며, I_{DC} 는 컨버터 출력전류를 나타내고 있다. 동작 파형에서와 같이 6-pulse-shift 구동시 스위칭 주기(T_S)내에 컨버터의 출력전류의 파형은 6개로 나타나게 된다. 본 논문에서는 전류형 컨버터의 PWM 신호 발생을 위하여 DSP(TMS320F2812)를 사용하였으며 PWM 모드를 비대칭 모드로 사용함으로써 한 컨버터의 스위치가 오프 되는 순간 다른 컨버터의 스위치가 온 되는 방식을 되어 스위칭 주파수를 6배로 한 경우와 완전히 동일하지는 않지만 거의 동일한 형태를 유지할 수 있다.

컨버터 출력단의 콘덴서(C_{DC})는 컨버터의 출력전류가 인버터의 전류로 되는 것을 막아 인버터부분의 스위칭 소자의 전류용량을 줄일 수 있는 적은 용량을 사용한다. 이 콘덴서의 용량이 지나치게 크게 되면 컨버터 출력전압(V_{DC})는 평활 되며 인버터에서는 정형적인 전류를 발생하지 못하게 된다.

그림 3은 동일 스위칭 주파수 하에서 기존의 컨버터에서 인덕터 및 출력전류 파형과 제안된 컨버터에서 인덕터 및 출력전류 파형을 나타내고 있다.

2.2 불연속모드하의 Buck-Boost 컨버터의 인덕터 선정

Buck-Boost 컨버터의 스위칭 주파수를 f_{sw} 라 하고 전원주파수를 f_s 라 하면 전원의 반주기동안 컨버터의 스위칭 횟수(N)는 아래와 같이 정의된다.

$$N = \frac{f_{sw}}{2f_s} \quad (1)$$

이 스위칭 횟수에 의해 스위칭 주기가 결정되면 스위칭 주기 내에서 스위치가 온 하는 시간의 여하에 따라 출력전류는 다양하게 나타난다. 본 논문에서는 Buck-Boost 컨버터가 불연속모드로 동작한다는 가정 하에서 단위역률로 전원측에 에너지를 공급하기 위한 각 컨버터의 스위칭 시간을 아래와 같이 스위칭 함수를 사용하였다.

$$t_n = \frac{1}{f_{sw}} D \sin \theta \quad \text{단, } \theta = \frac{\pi}{N} n, n=1,2,3, \dots, N \quad (2)$$

여기서 D 는 변조비(Modulation index)로 불연속모드로써 동작하기 위한 범위는 아래와 같다.

$$0 \leq D \leq \frac{V_s}{V_s + V_{IN}} \quad (3)$$

식 (2)의 스위칭 함수에 의한 각 스위칭 구간에서의 인덕터 L 에 축적되는 에너지는 식 (4)과 같이 표현된다.

$$E_n = \frac{1}{2} \frac{V_s^2}{L f_s^2} D^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{N} n \right) \quad n=1,2,3, \dots, N \quad (4)$$

만일 손실을 무시하면 인덕터의 축전된 에너지는 모두 출력측으로 전달되고, \sin 항을 전원전압으로 취하면 단위 역률시의 전력과 동일한 형태가 된다. 식 (4)의 인덕터의 축적에너지 식에서 전력식으로 변환하면 식 (5)와 같이 표현된다.

$$W = 60 \frac{V_s^2}{L f_s^2} D^2 \sum_{n=1}^{n=N} \sin^2 \left(\frac{\pi}{N} n \right) \quad (5)$$

따라서 한 조의 Buck-Boost 컨버터에서 원하는 출력을 발생하기 위한 인덕터의 크기는 식 (6)과 같이 주어진다.

$$L = 60 \frac{V_s^2}{W f_s^2} D^2 \sum_{n=1}^{n=N} \sin^2 \left(\frac{\pi}{N} n \right) \quad (6)$$

따라서 한 조의 Buck-Boost 컨버터에서 원하는 출력을 발생하기 위한 인덕터의 크기는 식 (6)과 같이 주어진다.

3. 실험 결과

제안하는 전류원형 PWM 인버터가 계통 연계를 위한 인터페이스 회로로서의 타당성 여부를 검증하기 위하여 시작품을 제작하였다. 그림 4는 인버터의 제어 블록도를 나타낸다. 전체 시스템의 제어는 TMS320F2812를 이용하였다. 태양전지 모듈의 최대출력전압은 52.3[V]이다. 따라서 태양 전지로부터 AD 컨버터를 통해 입력된 신호와 제어 신호에 의해 PI 제어를 통한 최대출력제어를 수행하게 된다. 인덕터 전류가 전류 불연속 모드에서 동작을 수행하여야 하므로 듀티비 제한을 두고, anti windup 기능을 추가하여 형성된 PWM1~PWM6 신호를 6개의 Buck-Boost 컨버터의 $Q_A \sim Q_F$ 에 인가하였다. $Q_A \sim Q_F$ 의 스위칭 주파수는 25[kHz]로 선정하였다. 따라서 6-pulse-shift 구동 Buck-Boost 컨버터의 출력단은 150[kHz]로 동작하게 된다.

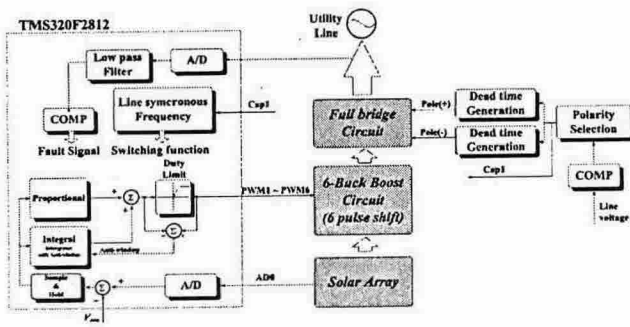


그림 4 제안된 인버터의 제어블록도
Fig. 4 Control block diagram of proposed inverter

계통 전압과의 동 위상을 이루기 위해 하드웨어적으로 인터페이스화 하여 풀 브리지단의 스위치를 제어하였다. 계통 사고시 인버터를 보호하기 위하여 V_{DC} 단 전압에 의한 과전압 검출기능을 부과하였고, I_{OUT} 전류에 의한 과전류 검출 기능을 부과하였다. 과전압이 발생할 수 있는 경우는 계통선의 단락으로 전류형 컨버터에 의한 과전압과 전원 전압에 의한 과전압으로 나눌 수 있고, 과전류가 발생할 수 있는 경우는 전원 정전과 제어기의 불안정으로 나눌 수 있다. 과전압 또는 과전류에 의한 Fault가 발생하면 전원전압을 검출하여 정전의 여부를 판단하고, 정전으로 판단 될 시에는 제어기는 대기모드로 전환되면 전원전압이 정상적으로 되면 제어기가 동작하나 이외의 경우에는 알람기능 모드로 전환하게 된다.

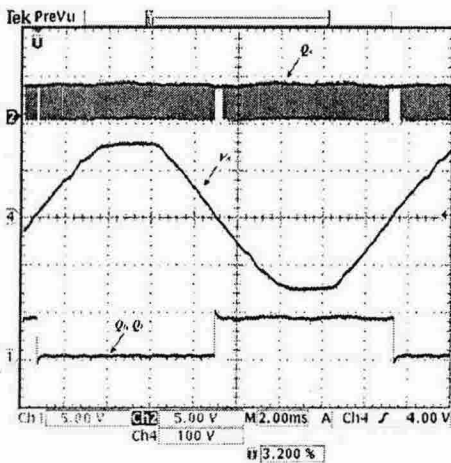


그림 5 스위칭 신호와 계통 전압
Fig. 5 Switching signals and line voltage

그림 5는 전원전압 (V_D)과 6-pulse-shift 구동되는 Buck-Boost 컨버터 중 한 신호 (Q_A) 그리고 극성 걱정을 위한 인버터의 스위칭 제어 신호 (Q_1 , Q_2)를 나타낸다. 스위칭 소자 중 Buck-Boost 컨버

터의 스위칭 신호인 Q_A 는 단위 역률이 될 수 있도록 쇼핑 동작을 수행하고, 풀 브리지단의 스위치는 출력 극성의 정·부를 결정하는 제어 신호에 의해 온·오프 동작을 수행하게 된다.

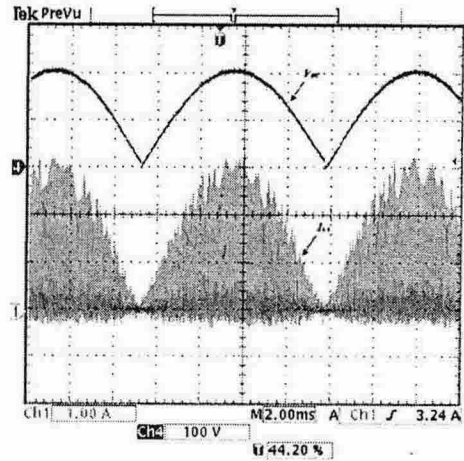


그림 6 컨버터의 출력 전압 및 전류
Fig. 6 Output voltage and current of Buck-Boost converter

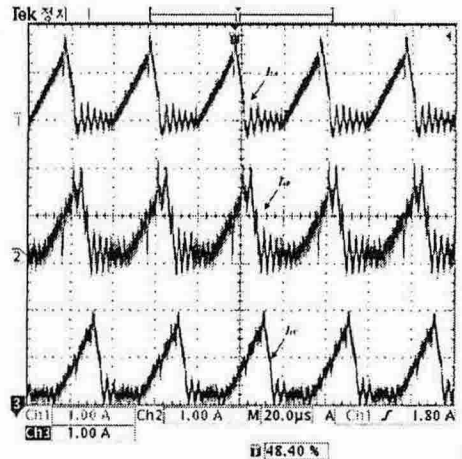
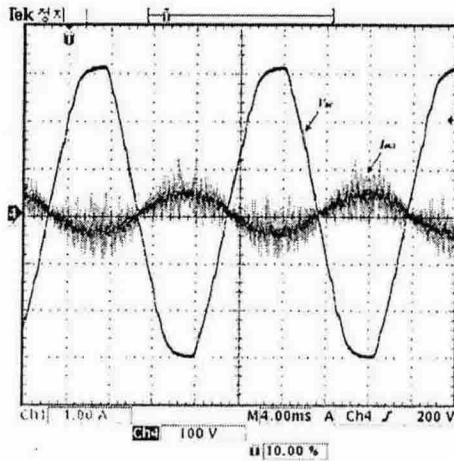


그림 7 6-pulse-shift 초퍼 구동 파형
Fig. 7 Waveform of 6-pulse-shift Chopper

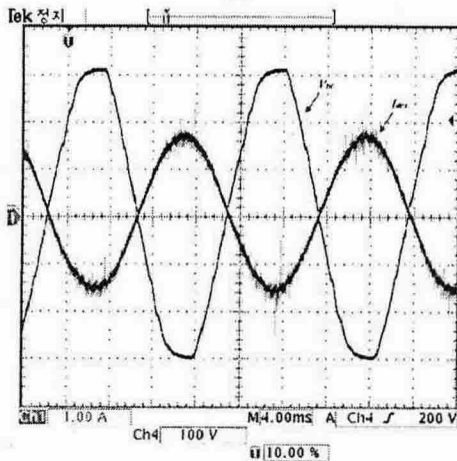
그림 6은 6-pulse-shift 구동 컨버터의 출력전압 (V_{DC})과 컨버터의 인덕터 전류 (I_{LA})을 나타낸다. 불연속 모드로 동작하던 인덕터 전류는 필터를 거친 후 연속적인 전압으로 바뀌어 인버터 인가전압으로 사용된다. 그림 7은 제안된 인버터의 6-pulse-shift 구동을 한 경우의 실험 파형을 나타낸다. 그림 8은 최대출력전압인 태양 전지 모듈의 출력전압을 200[V]로 제어하면서 출력이 110[W] 및 350[W]일 때 전원전압과 출력전류를 나타내고 있다.

태양 전지의 출력 특성은 계속적으로 변화하는

일사량과 온도, 부하 상태 등에 의해 변동하기 때문에 태양 전지의 최대 출력점은 변하게 되므로 어떠한 상황에서도 항상 최대 출력점에서 동작하도록 제어하여야 한다^{[3],[4]}.



(a)



(b)

그림 8 계통전압 및 출력전류
 (a) 110[W] 출력시 (b) 350[W] 출력시
 Fig. 8 Line voltage and output current of inverter
 (a) Case of 110[W] output power
 (b) Case of 350[W] output power

4. 결론

본 논문에서는 Buck-Boost 타입의 불연속모드 PWM 인버터로 구동되는 태양광 발전 시스템에서 인버터의 스위칭 주파수를 줄이고 효율을 개선하기 위하여 인버터의 6-pulse-shift 구동방식을 제안하고, 태양 전지 모듈에서 발생하는 전기에너지를 축전지에 충전하지 않고 순시적으로 전원측으로 보내주는 태양광과 계통 연계를 위한 인터페이스 회로로서의 타당성을 실험을 통해 검증하였다. 제안하

는 회로는 6개의 Buck-Boost 컨버터를 기본 토폴라지로서 하여 6-pulse-shift 전류형 컨버터를 구성하여 전류의 크기를 순시적으로 제어하였으며, 인버터는 AC 출력단의 정·부 방향을 결정 하는데 이용하였다. 그러므로 인버터 부분에서 스위칭에 의한 손실을 상당히 저감시킬 수 있는 장점을 가진다. 또한 입력단의 인덕터 전류를 전류 불연속 모드로 동작시켜 별도의 입력 전류의 검출이 없이도 출력단을 단위 역률화 할 수 있는 장점을 가진다. 제안하는 계통 연계형 인버터에 대한 동작을 이론적으로 분석하고 TMS320F2812을 이용한 시작품의 실험 결과로 이의 타당성과 실용화 가능성을 검증하였다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구 센터 육성·지원 사업에 의해 작성되었습니다.

참고 문헌

- [1] Michihiko Nagao, and Koosuke Harada, "Power Flow of Photovoltaic System using Buck-Boost PWM Power Inverter", IEEE/PEDS, pp.144-149, 1997.
- [2] Johanna M. A. Myrzlk, "Novel Inverter Topologies for Single-Phase Stand-Alone or Grid Connected Photovoltaic Systems", IEEE PEDS, pp.103-108, 2001.
- [3] 이승환, 성낙규, 오봉환, 김성남, 이훈구, 김용주, 한경희, "PWM 초퍼와 전류원형 인버터를 이용한 계통 연계형 태양광발전시스템", 전력전자학회 논문지, 제3권, 제4호, pp. 323- 329, 1998. 12.
- [4] 유택빈, 성낙규, 이승환, 김성남, 이훈구, 한경희, "초퍼와 PWM 전압형 인버터를 이용한 계통연계형 태양광 발전시스템에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제3권, 제2호, pp. 131-137, 1998. 6.
- [5] 황인호, 안교상, 임희천, 김신섭, "계통연계 태양광발전시스템의 제어기법 및 연계운전 특성", 전력전자학회 논문지, 제5권, 제2호, pp.123-129, 2000. 4.
- [6] 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.
- [7] 박성준, 허권행, 강필순, 김철우 "DSP를 이용한 태양광 발전 시스템용 전류형 PWM 인버터" 전력전자학회 논문지, 제7권, 제5호, pp.437-442, 2002. 10.