

# 최적 일체형 태양광 발전용 전력변환장치

## PCS 특성에 관한 연구

### A Study on the Characteristics of PCS Using a Solar Cells Generation of Optimal Integrated

황 락 훈\*<sup>★</sup>

Lark Hoon Hwang\*<sup>★</sup>

#### Abstract

In this paper, we modeled the devices used easily in PV system circuits. Simulation tools use PSPICE to enable intuitive electrical circuit simulations. Simulations were also performed on the effects of temperature and spatial radiation that are easy to overlook when using solar cells using modelled libraries. In addition, for full operation of the photovoltaic system, a complete operation system for the DC-DC buck-boost converter and the MPPT(Maximum Power Point Tracking) control system was modeled and simulated to confirm good operation. In order to verify the operation of the simulation, we constructed an actual system with the same conditions in the simulation and experimented. As a result, we proposed a single-phase 3 kW grid-connected solar power converter.

#### 요 약

본 논문에서는 PV 시스템에서 사용되는 회로들을 쉽게 해석할 수 있도록 모델링하였다. 시뮬레이션 툴은 직관적인 전기회로 시뮬레이션이 가능한 PSPICE를 이용하였다. 모델링한 라이브러리를 이용하여 태양전지의 사용에서 간과하기 쉬운 온도와 공간방사의 영향에 대해서도 시뮬레이션을 수행하였다. 이와 더불어 태양광 발전 시스템의 완전한 동작을 위해 DC-DC buck-boost 컨버터와 MPPT 제어 시스템에 대한 완전한 동작 시스템에 대해 모델링하고 시뮬레이션을 수행하여 양호한 동작을 확인할 수 있었다. 또한 시뮬레이션의 동작을 입증하기 위하여 시뮬레이션에서와 동일한 조건의 실제 시스템을 구성하여 실험을 수행 하였으며 실험의 결과와 시뮬레이션의 결과가 동일한 동작을 수행하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 단상 3[kW] 계통연계형 태양광 전력변환기를 제안하였다.

*Key words : photovoltaic, MPPT, buck-boost converter, power factor, PSPICE, switching frequency*

\*Dept. of Electrical Engineering, Semyung University

★ Corresponding author

E-mail : hhwang@semyung.ac.kr, Tel : +82-43-649-1301

※ Acknowledgment

This paper was supported by the Semyung University Research Grant of 2019.

Manuscript received Sep. 9, 2019; revised Sep. 24, 2019; accepted Sep. 26, 2019.

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.

#### I. 서론

신재생에너지원 중 가장 활발하게 보급되고 있는 에너지원이 풍력과 태양광에너지이다. 국내에서도 이러한 관점에서 풍력과 태양광에너지의 보급에 주력하고 있다.

대부분의 연구에서 실험에 앞서 제안한 이론을 입증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하는 단계가 필수적이다. 태양광 발전 시스템의 설계에 있어서도 시뮬레이션이 반드시 필요 한 단계로 C-언어나 전기회로 전용 시뮬레이터인 PSPICE, PSIM, Matlab

등을 사용한다. 시뮬레이션을 C-언어로 수행 하면 세부적이고 정밀한 시뮬레이션은 가능하나 일반적으로 사용하기에는 전문적인 지식이 필요하고, 시스템의 변경이나 추가 등에 따라 많은 수고가 따르게 된다[1]-[3]. PSPICE는 사용 하기는 편리하지만 세부적인 설정이나 새로운 소자 등의 파라미터 적용에 한계가 있다. 또한 PSPICE에서 태양전지의 시뮬레이션을 수행하기 위하여 대부분 범용 다이오드를 이 용하여 시뮬레이션 하는데 개략적인 동작 특성은 나타나지 만 세부 파라미터 값 등의 설정이 용이하지 않아서 온도 특성 등에 대해서 무시하고 진행하게 되어 실제 시스템의 구축에서 적지 않은 시행착오를 가져오게 된다[4]-[7]. 논문에서는 범용적인 시뮬레이터인 PSPICE를 이용하여 태양전지와 제어기 등을 모델링하고 라이브러리 화 하였다. 모델링은 등가회로를 이용하여 구성하였으며 라이브러리 화 함으로써 태양광 발전 시스템을 시뮬레이션 하는데 변수 설정 등을 손쉽게 하여 사용하는데 편리하게 하였다. 이 라이브러리를 이용하여 태양광 시스템의 기본적인 설계문제나 크기, 해석 등을 해결하는데 사용할 수 있도록 하였다. 아울러 본 논문에서 구축한 라이브러리의 타당성을 입증하기 위하여 온도, 공간복사의 변화에 대해 시뮬레이션을 수행하여 동작특성을 확인하였다. 이와 연계하여 전체 시스템 구동을 위해 DC-DC 벅-부스트 시스템과 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 시스템을 모델링하여 전체 태양광 발전 시스템의 구동특성을 시뮬레이션하고 라이브러리 화 하였으며, 시스템 변수 등의 변화에 대해 손쉽게 가변하여 사용할 수 있도록 하였다. 또한 시뮬레이션의 타당성을 입증하기 위하여 동일한 조건하에 하드웨어를 구성하고, DSP를 이용한 제어기를 구현하여 실제 시스템에 대한 실험을 수행하고 결과를 확인 하였다. 전력용 반도체로 구성된 컨버터, 인버터, 초퍼 등 전력전자 기술 분야는 다이리스터(대 전력 스위칭소자)가 개발되면서 특성이 우수한 여러 반도체 전력변환장치들이 개발 및 보급되기 시작하였다[8]-[12]. 또한 전력용 반도체 기술의 발달로 소자정격의 증대와 최근 IGBT 등 새로운 소자들이 개발되어 여러 전력변환장치들에 이용되고 있으며, 마이크로프로세서의 도입으로 과거 불가능했던 제어기술들이 실현 가능해짐으로써 전력변환기술 및 제어방법 역시 크게 발전하고 있다.

전력회생이 가능한 PWM(펄스 폭 변조) 컨버터의 출현은 정류회로의 입력전류를 정현파로 하고 출력 직류전압과 입력측의 역률제어와 전력회생이 가능한 PWM(펄스 폭 변조) 컨버터의 연구가 널리 진행되고 있으며 직류측의 평활용 콘덴서의 용량을 저감하여 장치의 소형화 및 경량화가 기대되고 있다.

이는 교류측 입력 전류분을 정현파에 가깝게 하여 고조파 성분을 감소시키고, 부하에 관계없이 고역률 운전이 가능하며 필요에 따라 진상 및 지상운전이 가능하며, 전력의 흐름이 양방향으로 가능하여 구동 및 회생운전이 가능한 특징으로 인하여 인버터 등의 전압원으로 사용되고 있다[13]-[14].

하지만 최근의 전력변환기 시장의 추세를 보면 저가화가 지속적으로 요구되고 있는 상황에서 중소기업에서 획기적인 원가 절감 기술을 확보하지 않으면 시장에서 영업 활동을 영위할 수가 없는 현실이고 기존의 전력변환기를 생산하던 기업들도 생산을 중단하는 사태가 발생하고 있고 태양광시스템을 설치하는 기업은 전력변환기의 수급에 어려움을 겪고 있다. 이미 오래전부터 계통 연계형 태양광 전력변환기의 개발 형태는 대용량으로 전환되므로 제반 기술을 연구 및 개발하기가 어렵고, 단위역률 제어법을 이용한 변환기효율을 97[%] 이상 구현하기 위한 기술을 구축하기가 어렵다[15]-[18].

본 논문에서는 이러한 문제점들을 고려하여 전압 변동율이 심하거나 전원 불 평형 시에도 안정적으로 동작이 가능하며 고효율과 단위역률로 제어가 가능한 시스템을 제안하고자 하며, 복잡한 태양광 발전장치의 전원 공급 과정을 최소화 하고자 전력변환기와 접속반을 일체화하여 원가 절감 및 효율 향상을 꾀하고자 한다.

따라서 이러한 문제점을 원칙적으로 해결하고자 저가/저 품질의 부품이 아닌 품질이 확보된 주요 부품을 사용하는 동시에 원가 경쟁력 확보를 위하여 전력변환기의 제어기를 프로그래밍을 통한 제어 기술을 적용하여 기존 제품과의 차별성을 가지도록 한다.

## II. PV전지의 모델링

### 1. PV전지의 최대출력점 이론

PV전지의 모델은 그림 1과 같이 이상적인 다이

오드와 병렬로 연결된 이상적인 전류원을 가진 등가회로 나타낼 수 있다. 전류원은 광자에 의해 발생된 전류를 의미한다.

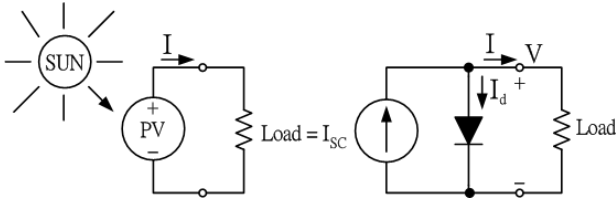


Fig. 1. PV cell with a load and its simple equivalent circuit. 그림 1. 부하를 가진 PV전지와 등가회로

2가지 파라미터가 PV셀 특성을 나타내기 위해 자주 사용된다. 그림 2(a)에서 전류를 발생시키는 광자(irradiance)는 단락회로 전류(short circuit current) ( $I_{sc}$ )로 셀의 출력으로 흐른다. 따라서,  $I_{ph} = I_{sc}$ 이다. 그림 2(b)에서 처럼 PV셀이 연결되지 않았을 때(개방회로)전류를 발생시키는 광자는 고유의 p-n 접합 다이오드에 의해 내부적으로 단락이 되어 개방회로 전압(open circuit voltage)( $V_{oc}$ )이 구해진다. PV모듈(PV module)이나 셀 제조업자들은 데이터 시트에 이러한 파라미터들을 제공한다.

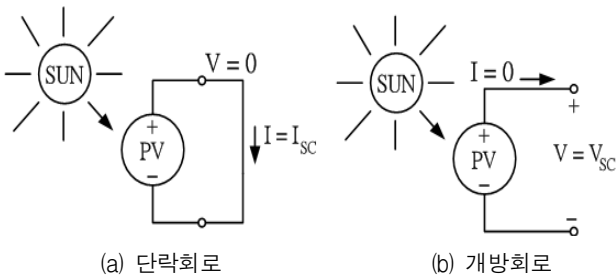


Fig. 2. Short circuit and open circuit. 그림 2. 단락회로와 개방회로

PV 셀의 전압-전류 관계식을 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$I = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

다이오드 역 포화 전류  $I_0$ 는 일정한 온도에서 일정하고 그림 2(b)의 개방 회로에서 구할 수 있다. 식 (1)을 사용하여,  $I=0$ 로 하면,  $I_0$ 는 식 (2)~식 (3)으로부터 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$0 = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$I_{sc} = I_0 \left( e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left( e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right)} \quad (4)$$

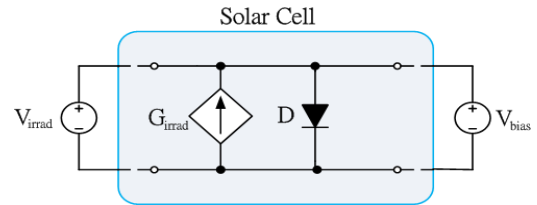


Fig. 3. Solar Cell Model. 그림 3. 솔라 셀 모델

지름이 6인치 solar cell에서, 복사조도(irradiance)  $G$ 를 200, 400, 600, 800, 1000[W/m<sup>2</sup>]으로 변화할 때 V-I 특성곡선을 그림 4에 나타냈다. 단,  $J_{sc} = 34.4$  [A/cm<sup>2</sup>],  $J_0 = 10^{-11}$  [A/cm<sup>2</sup>]

여기서,  $J_{sc}$  : short-circuit spectral density current [A/cm<sup>2</sup>]

$J_0$  : reverse saturation current density [A/cm<sup>2</sup>]

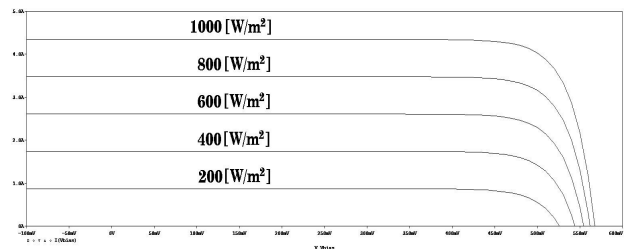


Fig. 4. V-I characteristics of PV cell when changing Irradiance. 그림 4. 임피던스 변화 시 PV셀의 V-I 특성

## 2. PV전지의 모델링

가. 직렬저항(series resistance)

실제적인 태양전지에서 저항 손실은 직렬저항  $R_s$  하나로 묶는다. 이러한 영향은 직렬연결로 구성된 PV 모듈에서 매우 잘 나타나고, 저항의 값은 전지의 수에 따라 증가한다.

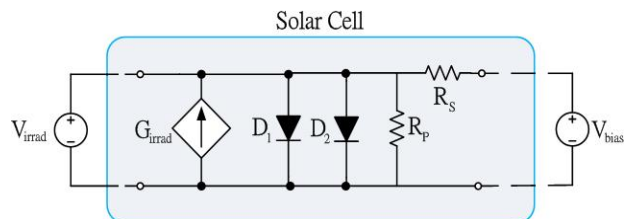


Fig. 5. PV cell model. 그림 5. 태양전지 모델

다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 의 결합으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_{sc} - I_0 \left[ e^{q \left( \frac{V + I \cdot R_s}{nkT} \right)} - 1 \right] - \left( \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \right) \quad (5)$$

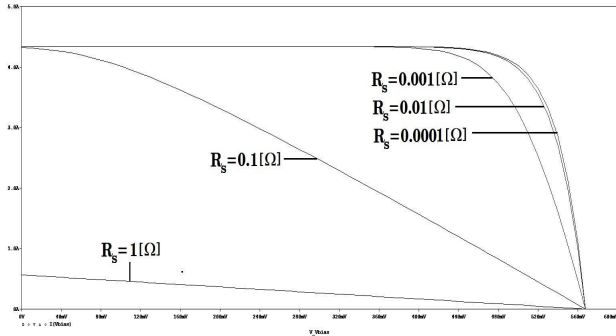


Fig. 6. V-I curve of PV cell(series resistance).  
그림 6. 태양전지 V-I 곡선(직렬저항)

나. 분로저항(Shunt resistance)

병렬로 연결된 소자에서 저항을 통해 흐르는 미세 누설전류와 관련된 손실이다. 이것은 분로저항  $R_p$ 로 나타낸다. 이러한 영향은 직렬연결로 구성된 PV 모듈에서 더 적게 나타나고, 커다란 시스템에서 PV 모듈의 수가 병렬로 연결되었을 때 현저하게 발생한다.

$I(V)$ 특성은  $-1/R_{sh}$ 의 기울기를 갖는 직선을 나타낸다. 분로저항의 작은 값은 FF(Fill Factor)를 크게 감소시킨다.

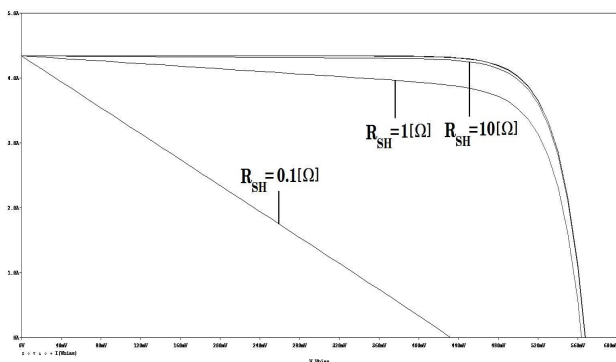


Fig. 7. V-I curve of PV cell(shunt resistance).  
그림 7. 태양전지 V-I 곡선(분로저항)

다. 재결합 다이오드(recombination diode)

재결합 다이오드의 영향을 없애기 위해서는 분로저항은 높은 값, 직렬저항은 낮은 값으로 선정한다.

그림 8은 파라미터  $J_{02}$ 의 값을 변화 했을 때의 시뮬레이션 결과이다. 이것은 개방회로의 전압과

FF에서 특성이 많이 떨어지는 재결합 다이오드의 영향을 나타내며 단락회로 전류는 일정하다.

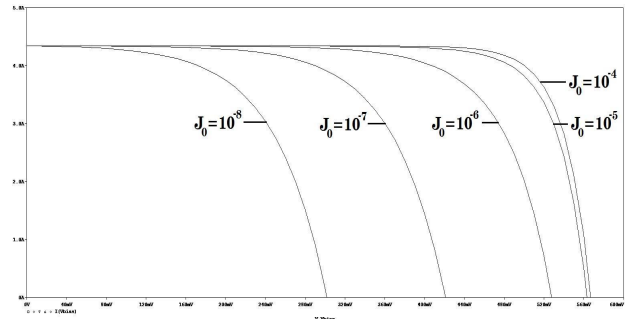


Fig. 8. V-I curve at  $J_{02}$  change of recombination diode.  
그림 8. 재결합 다이오드의  $J_{02}$  변화 시 V-I 곡선

라. 온도의 영향(temperature effects)

동작 온도(operating temperature)는 태양전지의 전기적인 응답에서 많은 영향을 가진다. 이러한 것들은 고려하면, 지구상에서는 60~65°C까지 예열(warm up)하고, 우주(space)나 인공위성(satellite)에서는 온도가 이것보다 높으므로, 전기적인 파라미터의 온도계수 모델링은 필수적이다.

태양전지에서 온도 영향은 등가회로에 포함된 다이오드 모델의 파라미터에 지정되어 있다. 즉, 다이오드의 포화밀도전류(saturation density current)는 온도에 의해 좌우되고 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$J_0 = B T^{XTI} e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (6)$$

여기서, B : 온도의 일정독립변수

XTI : 온도의 독립변수에 대한 PSPICE 파라미터

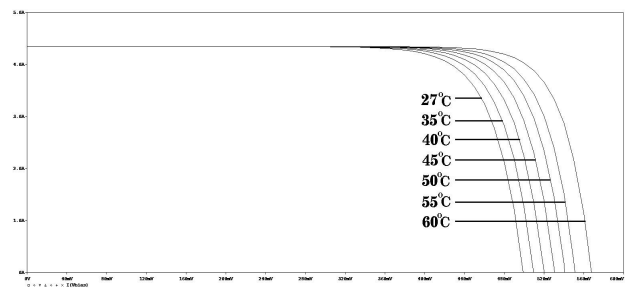


Fig. 9. V-I curve at temperature change.  
그림 9. 온도 변화 시 V-I 곡선

태양광의 기본 모듈은 직렬로 연결된 태양전지의 수로 구성된다. 일반적으로 33~36개 이지만 다른 조합도 가능하다. 전지사이의 연결은 금속 줄을 사

용하여 만든다. 태양광 모듈 특성은 한 개 태양전지의 V-I 특성 전압 크기로 부터 생긴다. 1개 태양전지의 V-I 특성으로부터 1개 PV모듈에 대한 전류는 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V+IR_s}{2V_T}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

태양전지의 병렬저항  $R_{sh}$  은 크고 그 영향을 무시할 수 있으며, 두 번째 다이오드의 영향도 무시할 수 있으므로,  $I_{02} = 0, R_{sh} = \infty$  이 되어 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) \quad (8)$$

$$I_M = I_{scM} - N_p I_0 \left( e^{\frac{V_M + R_{sM}}{nN_s V_T}} - 1 \right) \quad (9)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left( e^{\frac{V_{oc}}{nV_T}} - 1 \right)} \quad (10)$$

식 (9), 식 (10)은 PV모듈의 V-I특성의 기본 방정식으로 그림 10과 같이 PSPICE 등가회로로 나타낼 수 있다.

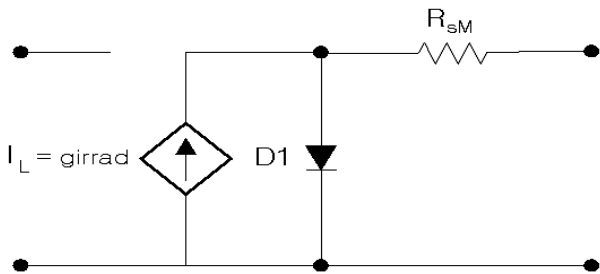


Fig. 10. PSPICE equivalent circuit of PV module.

그림 10. 태양전지 모듈의 PSPICE 등가회로

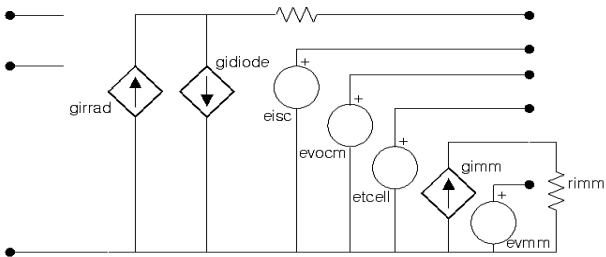


Fig. 11. PV module PSPICE equivalent circuit.

그림 11. 태양전지 모듈의 PSPICE 등가회로

PV모듈의 V-I특성의 기본 방정식으로 그림 11에 PV모듈에 대한 PSPICE 모델을 나타낼 수 있다.

### 3. 배터리와 부하에 연결된 PV모듈

배터리와 부하에 대한 PV 시스템은 그림 12에 나타낸 것과 같으며 여기서 3개의 소자들은 병렬로 연결되었다. 키르히호프의 전류법칙(KCL)에 의해 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$I_{mod} = I_{bat} + I_{load} \quad (11)$$

여기서,  $I_{mod}$  : PV시스템의 출력전류,  $I_{bat}$  : 배터리로 흐르는 전류,  $I_{load}$  : 부하에 흐르는 전류 납축전지 배터리 모델

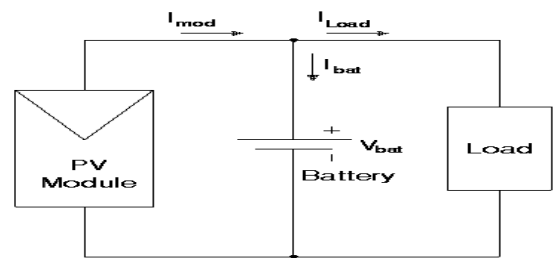


Fig. 12. PV module PSPICE equivalent circuit.

그림 12. 태양전지 모듈의 PSPICE 등가회로

그림 12에 의한 전압과 전류 시뮬레이션 파형을 그림 13에 나타내었다.

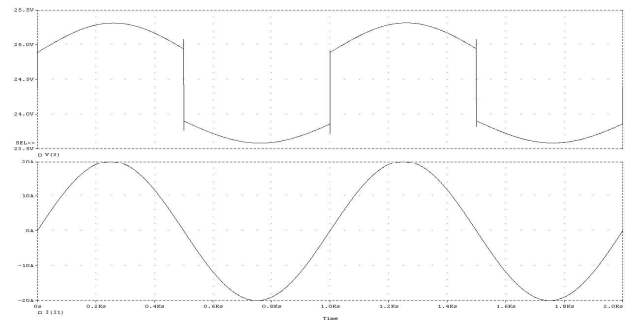


Fig. 13. Simulation of current and voltage waveform.

그림 13. 전류 및 전압 시뮬레이션 파형

### 4. 태양전지와 연결된 전력변환기 설계

가. 전압형 컨버터의 설계

전압형 컨버터는 그림 14에서 교류 측에 설치되어 있는 리액턴스의 크기와 리액턴스 양측전압에 의하여 변환되는 전력량이 결정된다. 또 리액턴스의 양단전압에 따라 전압형 컨버터의 동작이 달라진다. 그림 14에서와 같이 리액턴스 양측의 교류원전압과 변환기의 교류 측 전압을 V와 E라고 하면 다음과 같은 4가지의 동작 상태로 그림 15와 같이 분류할 수 있다.

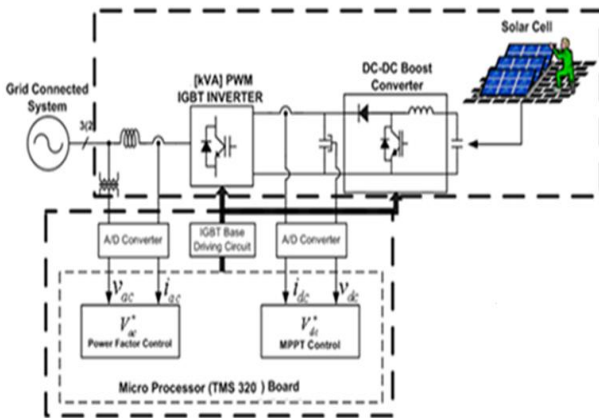


Fig. 14. Construction power converter.  
그림 14. 전력변환기의 구성도

- (1) V에 대하여 E의 동상성분이 작을 때 → 교류 전원에는 지상의 무효전류가 흐른다.
- (2) V에 대하여 E의 동상성분이 클 때 → 교류전원에는 진상의 무효전류가 흐른다.
- (3) V에 대하여 E의 벡터가 뒤질 때 → 교류전원에서 전력변환기로 전력이 공급된다.
- (4) V에 대하여 E의 벡터가 앞설 때 → 전력변환기에서 교류전원으로 전력이 공급된다.

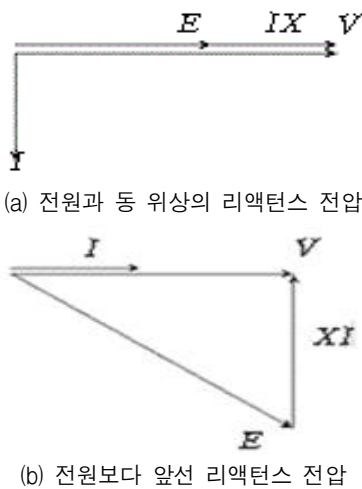


Fig. 15. The AC side vector of the voltage-type converter.  
그림 15. 전압형 컨버터의 교류 측 벡터도

나. 전압형 컨버터의 전력변환

전원과 변환기 교류 측 전압의 위상각을  $\alpha$ 로 한다. 교류 측의 전력은 그림 16과 같은 임의의 전압 벡터일 때에 대하여 산출한다.

$$IX \cos \phi = E \sin \alpha \tag{12}$$

$$IX \sin \phi = E \cos \alpha - V \tag{13}$$

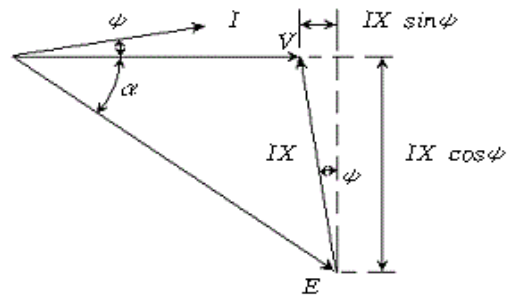


Fig. 16. Vector diagram of voltage converter.  
그림 16. 전압형 컨버터의 벡터도

$$I \cos \phi = \frac{E}{X} \sin \alpha \tag{14}$$

$$I \sin \phi = \frac{E \cos \alpha - V}{X} \tag{15}$$

식 (12)~식 (15)에 의해서 변환기의 위상 각  $\alpha$ 가 (+)일 때는 유효전류가(+)이므로 전원에서 변환기 측으로 전력이 공급되는 구동상태가 되며  $\alpha$ 가 (-)일 경우에는 유효전류가 (-)로 되므로 변환기에서 전원으로 전력을 공급하는 회생의 상태가 된다. 변환기의 교류 측 전압에서 전원과 동상성분의 전압이 클 때에는 무효전류가 (+)가 되며 이때는 진상의 무효전류에 해당한다. 반대의 경우에는 무효전류가 (-)가 되어 전원에는 지상의 무효전류가 흐르게 된다. 전압형 컨버터의 운전에 있어서 유효전류가 (0)이 되도록 하려면 위상각  $\alpha$ 를 (0)이 되어야 하므로 변환기는 전원과 동 위상으로 운전하여야 한다. 이때는 변환기의 교류 측 전압의 크기와 전원전압의 크기에 의하여 무효전류를 제어할 수 있다. 즉, 무부하의 전압형 컨버터는 무효전력을 발생하는 특성을 갖고 있다. 무효전류가 (0)이 되도록 변환기의 교류 측 전압과 위상을 제어하는 경우 변환기는 고 역률 상태에서 전력변환의 기능을 갖는다. 전력변환은 유효전류가 변환기의 위상 각  $\alpha$ 에 의하여 제어됨을 알 수 있다. 또한 유효전류는 변환기의 직류 측과 전력을 수수하므로 직류전압을 변화시키게 된다. 따라서 전압형 컨버터는 직류전압이 설정한 일정전압을 유지하도록 전압을 제어하는 변환회로가 필수적으로 첨가되어야 하며 이 때문에 변환기는 전압과 위상을 가변 할 수 있는 기능을 가져야 한다.

다. 전압형 컨버터의 제어

변환기의 출력은 그림 17 (a)와 같이 전류를 변환

기의 위상각으로 제어하는 특성을 갖고 있다. 변환기의 출력전류와 부하에 흐르는 전류가 같을 때 직류전압이 일정하게 유지된다. 그렇기 때문에 직류전압을 일정하게 유지하도록 변환기가 제어되어야 하며, 무효전류가 (0)이 되는 변조율과 위상각으로 운전하면 고 역률의 교류-직류변환기로의 특성을 갖게 된다. 또한 PWM방법이 적용되므로 출력전압은 전원의 교류전압보다 높게 된다.

직류전압이 제어되는 전압형 컨버터는 그림 17(b)와 같은 전압 원이 되며 부하가 기전력을 가진 경우에 회생의 기능을 갖는다. 컨버터는 교류 측을 고역률의 상태로 운전하는 경우 직류출력전압은 교류전원의 전압보다 높은 전압으로 되므로 전압형 컨버터는 일정한 전압을 출력하는 변환기가 된다.

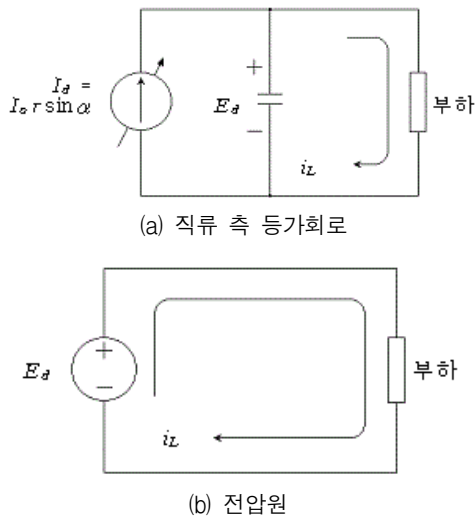


Fig. 17. Equivalent circuit of voltage type converter. 그림 17. 전압형 컨버터의 등가회로

교류 측의 전력은 전원전압, 변환기의 교류 측 전압과 위상각 및 리액턴스에 의한 식 (16)으로 된다.

$$P_a = \sqrt{3} \frac{VE}{X} \sin \alpha \tag{16}$$

변환기의 교류측 전압은 PWM의 변조율과 변환기의 직류전압에 관계하여 변조율을 r라고 하면, 식 (17)이 된다.

$$E = r E_d \tag{17}$$

한편 변환기의 직류전류는 직류 측에 공급되는 전력과의 관계에서 식 (18)이 된다.

$$I_d = \frac{P_a}{E_d} \tag{18}$$

따라서, 식 (16), 식 (17) 및 식 (18)의 관계로부터 변환기의 직류 측 전류는 식 (19)로 계산되어 질 수 있으며 식 (19)로부터 변환기의 제어는 변환기의 위상각으로 이루어짐을 알 수 있다.

$$I_d = \sqrt{3} \frac{rV}{X} \sin \alpha = I_o r \sin \alpha \tag{19}$$

라. 전압형 컨버터 제어기의 설계

P-I 제어기에 의하여 리액터 양단의 전압을 제어하여 목적한 크기의 전류가 흐르도록 할 수 있다. 전력변환기의 교류 측 전압은 직류전압과 PWM 변조율에 의하여 자유롭게 변화시킬 수 있으므로 식 (20)과 식 (21)을 구할 수 있다.

$$V_L = V - E = \Xi^* + \left( \frac{ki}{s} + kp \right) (I^* - I) \tag{20}$$

$$E = (V - \Xi^*) - \left( \frac{ki}{s} + kp \right) (I^* - I) \tag{21}$$

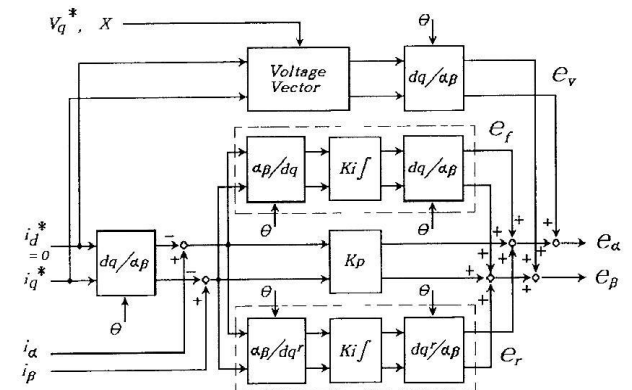


Fig. 18. Current control diagram.

그림 18. 전류 제어도

그림 18과 같이 비례(P)제어는 정지 좌표계에서 연산하고 적분(I)제어는 정상분과 역상분을 분리하여 각각 반대 방향으로 회전하는 두개의 회전 좌표계에서 연산을 한다. 블록도에서 e\_v는 전류오차 (I\* - I)를 입력으로 한 역상회전 좌표계에 대한 PI 제어기의 출력이다. e\_α, e\_β는 정상상태의 벡터를 포함하고 정상분과 역상분을 보상하는 최종 출력이며 전력변환기를 구동하는 신호가 된다.

그림 19와 그림 20은 제어블록을 포함하고 전압 제어와 전류검출 및 위상 검출방법을 나타낸 블록



도 및 전력변환기의 시스템을 나타낸 것이다. 전원의 위상 검출은 PLL 방법을 사용하여 위상각과 상회전의 방향을 프로그램에 의하여 계산되도록 하였다.

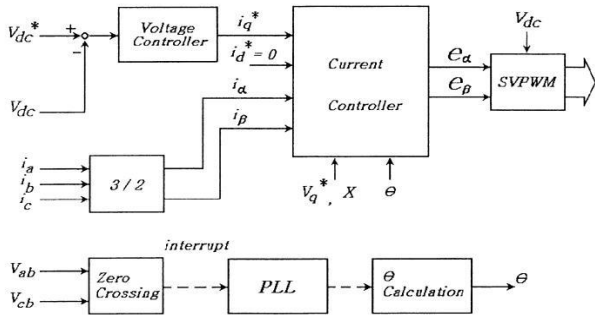


Fig. 19. Control of the converter.  
그림 19. 컨버터의 제어

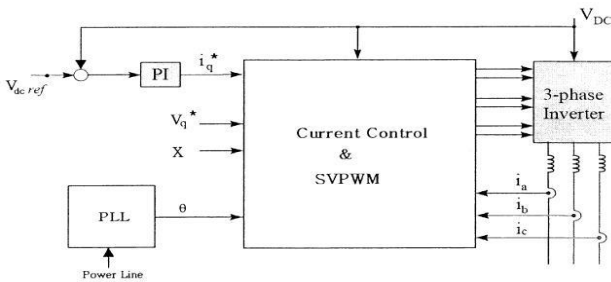


Fig. 20. Current control diagram.  
그림 20. 전류 제어도

III. 시뮬레이션 결과 및 고찰

1. 전체 회로도의 시뮬레이션 구성

그림 21은 본 연구에서 모델링한 전체 시스템의 시뮬레이션 회로를 나타내고, 각 모듈의 세부 기능은 표 1에 나타낸다.

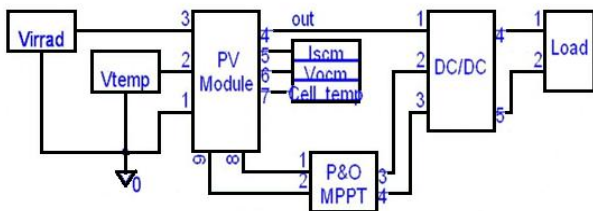


Fig. 21. Simulation circuit.  
그림 21. 시뮬레이션 회로

태양광 발전 시스템의 기본 구성 요소들을 모델링하여 라이브러리로 만듦으로써 PSPICE에서 제공하는 기본 라이브러리와 같이 손쉽게 시스템 구

Table 1. Features of simulation module.

표 1. 시뮬레이션 모듈의 기능

모듈	기능
Virrad	광량 변화량 값
Vtemp	온도 변화량 값
PV module	태양전지 모듈
P&O MPPT	MPPT 제어기
DC/DC	DC-DC 벡-부스트 컨버터
Load	부하(R-L 직렬)

성에 적용 할 수 있도록 한 결과, 실제 시스템과 유사하면서도 정확한 동작 특성을 얻을 수 있었다.

“Virrad”와 “Vtemp” 모듈은 자연환경 변수를 입력할 수 있는 모듈로 각각 광량과 온도의 변화량을 입력할 수 있도록 구성하고, 경우에 따라 일정 값 또는 하루나 월단위의 변화량을 입력할 수 있도록 하였다. “PV module”은 등가회로를 기본으로 구성하였으며, 모듈의 클릭으로 단락전류, 개방전압, 모듈의 수, 각종 계수 등을 제품의 규격에 맞게 입력할 수 있도록 하였다. “P&O MPPT” 모듈은 태양전지 모듈로부터 입력을 받아 각 시점의 최대 출력점을 DC/DC 컨버터 쪽으로 전달해 주는 역할을 한다. “DC/DC” 모듈은 벡-부스트 컨버터를 모델링 한 것으로 시비율, L, C 값을 입력할 수 있도록 하였으며, “Load” 모듈은 부하로써 R, L을 가변하여 사용할 수 있도록 구성하였다.

2. DC-DC 승·강압초퍼에서 MPPT 제어

PSPICE를 이용하여 모델링하고 시뮬레이션을 수행한 결과의 타당성을 입증하기 위하여 동일한 시스템을 실제 제작 하여 실험하였다. 실험 장치의 전체 구성을 그림 22에 나타내었고, 전력변환기에 대한 블록도는 그림 23에 나타내었다.



Fig. 22. power converter.  
그림 22. 전력변환기



출력전압 조정을 위해 시뮬레이션에서와 동일한 값을 갖는 DC-DC 벡-부스트 컨버터를 제작하였고, 전체 시스템 제어를 위해 사용되는 제어기는 TMS칩을 이용하여 C-언어로 구현하였다. 제어기 내부는 크게 전압과 전류 검출을 위한 A/D 변환기, 최대 출력점 제어를 위한 MPPT 알고리즘 구현기, 컨버터의 제어 신호 발생을 위한 PWM 신호 발생기로 구성되어 있다.

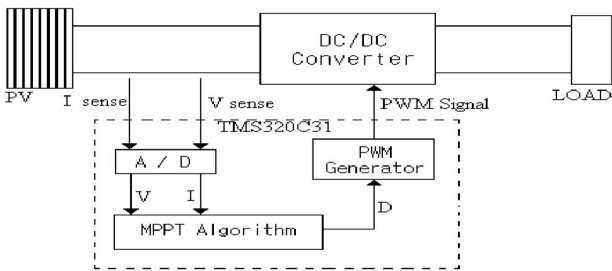


Fig. 23. Block diagram of main system.  
그림 23. 전체 시스템 블록도

그림 24는 실제 제어기를 구동하여 나타난 출력 파형을 나타낸 것이다. PV시스템의 출력은 다양한 데이터 처리 및 저장을 위해 LabView를 이용하여 PC 상에 구현한 오실로스코프 파형이다. 그림에서 보는바와 같이 시뮬레이션 결과와 같이 약 50[ms] 정도의 과도시간 후에 정상적인 최대 출력을 나타내는 양호한 실험 결과를 얻을 수 있었다. 이로써 앞서의 시뮬레이션이 정확하게 수행된 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 PSPICE 라이브러리를 이용한 시뮬레이션을 새로운 시스템 개발 및 성능 평가에 사용할 수 있을 뿐만 아니라 신뢰성을 높일 수 있다

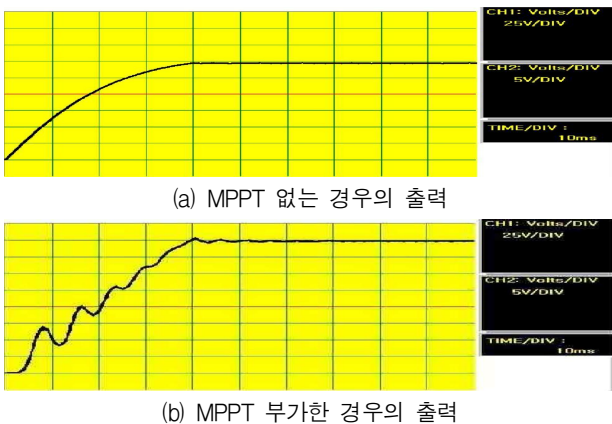


Fig. 24. Simulation waveform of PV system.  
그림 24. PV 시스템의 시뮬레이션 파형

2. 태양광 전력변환기 시험장치 및 시험

태양광발전용 단상 3kW급 저압용 인버터의 기본적인 성능 특성을 시험하고 성능 개선을 도출하기 위하여 다음 그림 25와 같이 시험 장치를 구성하였다. 정격 600[V] / 150[A] IGBT 모듈, 1[mH]의 인덕턴스, 3000[μF]의 필터 커패시터로 이루어진 10[kVA] 3상 전압형 PWM 컨버터이다. 3상분 전원전압과 전원전류를 각각 검출하여 아날로그 입력 멀티플렉서를 이용하여 샘플 앤 홀드회로를 구성하였으며, 출력 측 기준전압은 절연 증폭기를 이용하여 검출하였으며 DC 310[V]로 일정하게 유지하도록 되어있다.

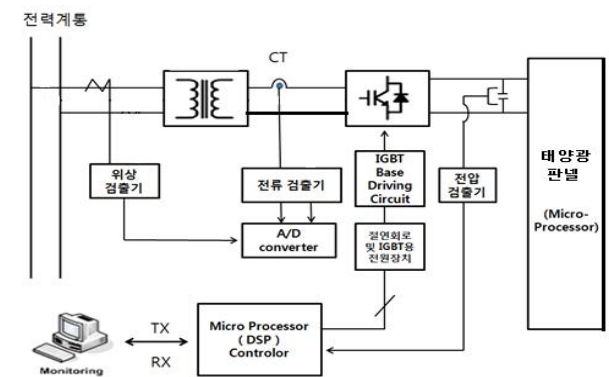


Fig. 25. Configuration of electric power converter test equipment.  
그림 25.전력변환기 시험 장치의 구성

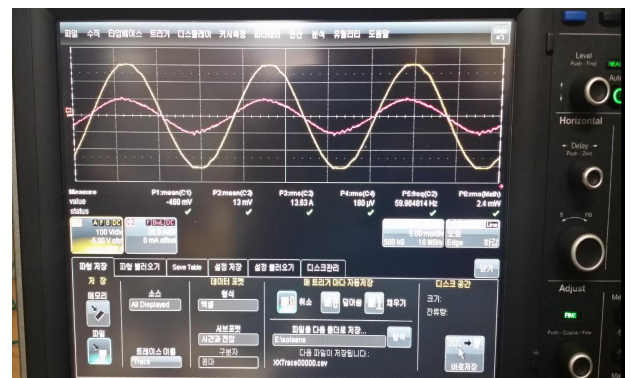
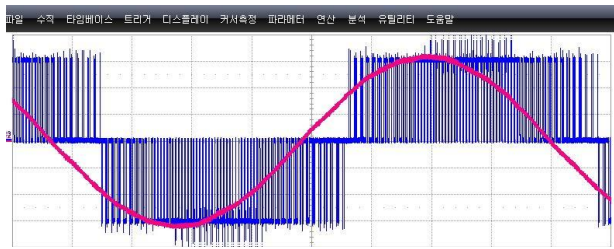
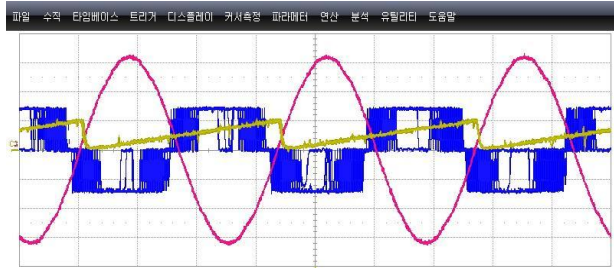


Fig. 26. Power converter output characteristic test.  
그림 26. 전력변환기 출력 특성 시험

전력변환기 설계 및 성능 시험을 실시한 결과 다음 그림 27과 같이 공간벡터 PWM 변조법에 의해 출력된 파형이며, 스위칭 주파수는 15[kHz]로 포팅되었고 전원 측 상전압 파형 및 동기신호 파형을 나타내고 있다. 그림 28은 부하시험 및 리사주 결과 파형의 결과를 나타내고 있다.



(a) PWM 변조파형(15kHz)



(b) 동기신호 파형

Fig. 27. Modulation waveform test result.  
그림 27. 변조파형 시험 결과

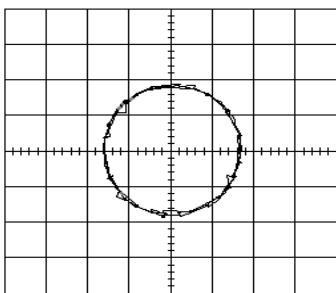
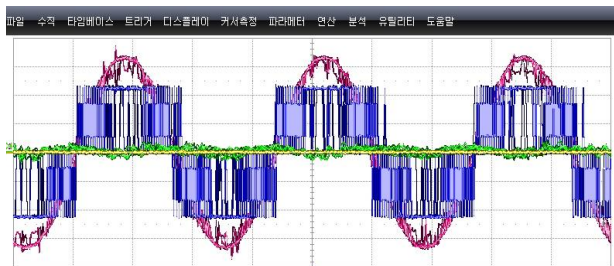


Fig. 28. Load test and Lissajous experiment result waveform.  
그림 28. 부하시험 및 리사쥬 결과파형

그림 29는 계통 연계형 3[kVA] 단상 전력변환기를 구성하여 부하시험을 시행한 결과이며, 그림 30은 단상 부하시험 시 역률 특성을 시험한 결과를 나타내고 있다. 단위역률로 제어됨을 알 수 있으며 무 부하에서 전 부하에 이르기까지 부하가 급변하더라도 계통에 연계되는 전원전압이 일정하게 유지되어 공급됨을 확인할 수 있었다. 또한 리액터를 변화시켜 전력변환기의 안정 동작을 확인하기 위해 시험을 하였으며 처음으로 Super core방식을 채

용함으로써 최종 단가와 전체 시스템의 사이즈를 줄일 수 있었다.

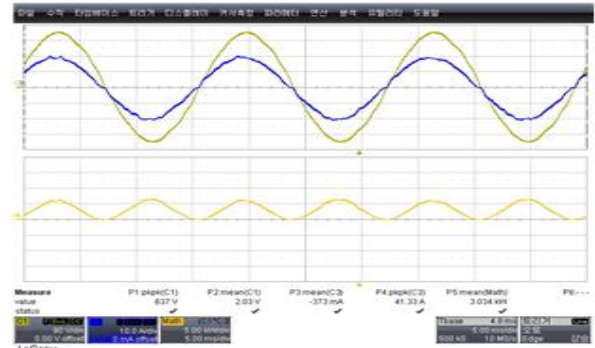
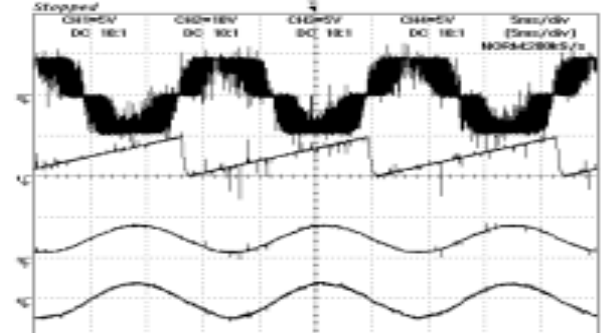
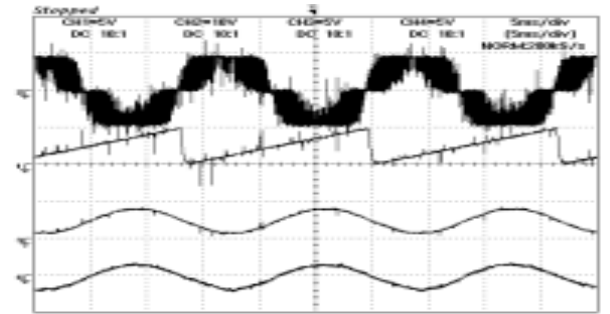
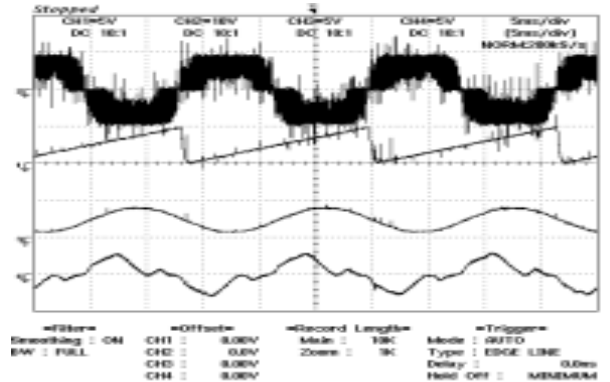
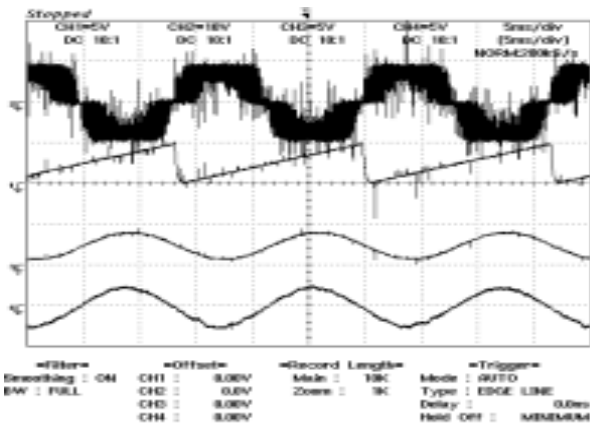


Fig. 29. 3 kVA load test.  
그림 29. 3 kVA 부하시험

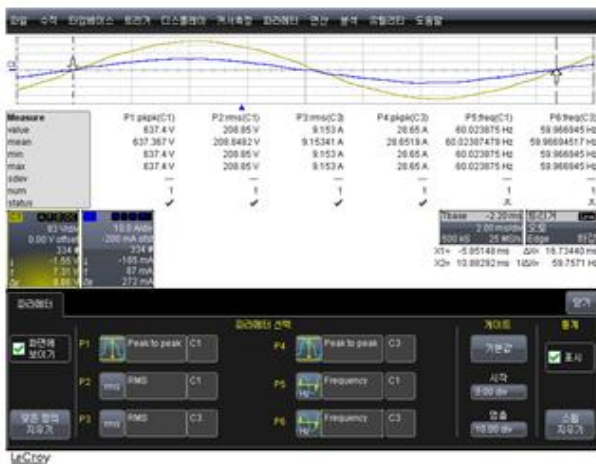


(a) 부하시험 결과(리액터 10[mH])





(b) 부하시험 결과(리액터 3[mH])



(c) 역률 특성

Fig. 30. Power factor characteristic in single-phase to load test.

그림 30. 단상 부하시험과 부하 시험 시 역률 특성

#### IV. 결론

본 논문에서는 실제 PV 시스템의 제작에 앞서 쉽게 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 모델링하였다. 시뮬레이션 툴은 직관적인 전기회로 시뮬레이션이 가능한 PSPICE를 이용하였다. 모델링한 라이브러리를 이용하여 태양전지의 사용에서 간과하기 쉬운 온도와 공간방사의 영향에 대해서도 시뮬레이션을 수행하였다. 이와 더불어 태양광 발전 시스템의 완전한 동작을 위해 DC-DC 벅-부스트 컨버터와 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 시스템에 대한 완전한 동작 시스템에 대해 모델링하고 시뮬레이션을 수행하여 양호한 동작을 확인할 수 있었다. 또한 시뮬레이션의 동작을 입증하기 위하여 시뮬레이션에서 동일한 조건의 실제 시스템을 구성하여 실험을 수행하였으며 실험의 결

과 단상 3[kW] 계통 연계형 태양광 전력변환기를 제안하였으며 IGBT 소자뿐만 아니라 GaN type MOSFET에 이르기까지 용량을 고려하여 다양화 및 대용량화가 가능한 설계 데이터를 확보하였다. 특히 GaN type MOSFET는 차세대 스위칭 소자로 손색이 없음을 확인하였으며 스위칭 주파수를 200[kHz]까지 확장이 가능하며 방열판(Heat sink)의 사이즈를 대폭 줄임으로써 효율 및 역률개선에 큰 도움을 줄 수 있는 가능성을 확인하였다.

따라서, 본 논문에서 수행한 모델링이 정확하게 이루어 졌음을 확인할 수 있음은 물론 이를 이용하면 기본적인 태양광 발전 시스템의 시뮬레이션을 수월하게 수행할 수 있으며 나아가 새로운 제어기법 등의 연구에 쉽게 적용할 수 있을 것이다.

향후 태양광 인버터를 이용하여 ESS 부착 시 독립형 시스템으로도 사용이 가능하며, 배터리 전원 측으로 에너지 회생이 가능하여 95% 이상의 효율을 가지고 있으며 에너지 절감효과가 있는 시스템을 구현 할 수 있는 가능성을 확인하였다.

#### References

[1] Y. Yusof, S. Sayuti, M. Latif, and M. Wanik, "Modeling and Simulation of maximum power traker for photovoltaic system," in *Proceedings of Power and Energy Conference*, pp.88-93, 2004. DOI: 10.1109/PECON.2004.1461622

[2] Kyritsis, A. Ch., Tatakis, E. C., Papanikolaou, N. P., "Optimum Design of the Current-Source Flyback inverter for Decentralized Grid-Connected Photovoltaic Systems," *Energy Conversion, IEEE Trans*, Vol.23, pp.281-293, 2008. DOI: 10.1109/TEC.2007.895854

[3] Sahlstrom, Theodore D., Hausgen, Paul E., Guerrero, Jim, Howard, Alex D., Snyder, Neil A., "Ultraviolet degradation testing of space protective coatings for photovoltaic cells," *Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE*, pp.1-5, 2008. DOI: 10.1109/PVSC.2008.4922511

[4] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, Yong Kang, "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems," *Industrial*



- Electronics, IEEE Trans*, Vol.55, pp.2622-2628, 2008. DOI: 10.1109/TIE.2008.920550
- [5] Xuecheng Zou, Kai Yu, Zheng, Xiaofei Chen, Zhige Zou, Dingbin Liao, "Dynamic Current Limitation Circuit for White LED Driver," *IEEE*, pp.898-901, 2008.  
DOI: 10.1109/APCCAS.2008.4746168
- [6] van der Broeck, Heinz; Sauerlander, Georg; Wendt, Matthias;, "Power Driver Topologies and control schemes for leds," *IEEE*, pp.1319-1325, 2007. DOI: 10.1109/APEX.2007.357686
- [7] wing Yan Leung, Tsz Yin Man; Mansun Chan, "A high-power - LED drver with power-efficient LED-current sensing circuit," *IEEE*, pp.354-357, 2008.  
DOI: 10.1109/ESSCIRC.2008.4681865
- [8] Huang-Jen Chiu, Yu-Kang Lo, Jun-Ting Chen, Shih-Jen Cheng, Chung-Yi Lin, Shann-Chyi Mou, "A High-Efficiency Dimmable LED Driver for Low-Power Lightng Applications," *IEEE*, pp.735-743, 2010. DOI: 10.1109/TIE.2009.2027251
- [9] Tzuen-Lih Chern, Li-Hsiang Liu, Ping-Lung Pan, Yi-Jie Lee, "Single-stage Flyback converter for constaant current output LED driver with power factor correction," *IEEE*, pp.2891-2896. 2010.  
DOI: 10.1109/ICIEA.2010.5515433
- [10] Yoo Juhyun, Kim Kookjin, Jeong Yeongho "Electial Properties of Low Temperature Sintering Step-Down Multilaye Piezoelectric Transformer," *JJAP* Vol.46, Issue.20, pp.486-488, 2007.  
DOI: 10.1143/JJAP.46.L486
- [11] Soon-Jong Jeong, "Two-layered Piezoelectric bender device for micro-power generator" *Science Direct*, Vol 148, Issuel, 4November 2008, pp.158-167.
- [12] Hyun-Cheol Song, "Multilayer piezoelectric energy scavenger for Large current generation," *Springer Link*, Vol.23, No.2-4, pp.301-304, 2009.  
DOI: 10.1007/s10832-008-9439-9
- [13] Suan Dwari, Leila Parsa "Efficient low voltage direct AC/DC converters for self-powered wireless sensor nodes and mobile electronics," *IEEE Telecommunications Energy Conference*. pp.1-7, 2008.

DOI: 10.1109/INTLEC.2008.4664097

- [14] M. J. Guan, W. H. Liao "On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltages," *IOP Smart Mater. Struct*, Vol.16, No.2, pp.498-505, 2007.

DOI: 10.1088/0964-1726/16/2/031

- [15] Shar. Roundy "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion," *Ph.D. Dissertation, U.c. Berkeley* 2003.

DOI: 10.1007/978-1-4615-0485-6

- [16] J. A. Paradiso and T. Stmer, "Energy Scavenging for Movile and Wireless Electronics," *ve CIEEE Pervasiomputing*, vol.4, no.1, pp.18-27, 2005.

DOI: 10.1109/MPRV.2005.9

- [17] G. K. Ottman, H. F. Hoffman, A. C. Bhatt and G. A. Lesieutre, "Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply," *IEEE Trans. Power Electron*, vol.18, pp.696-703, 2003.

- [18] M. Philipose, J. R. Smith, B. Jiang, A. Mamishev, S. Roy and K. Sundara-Rajan, "Battery-Free Wireless Identification and Sensing," *IEEE Pervasive Computing*, vol.4, pp.37-45, 2005.

DOI: 10.1109/MPRV.2005.7

## BIOGRAPHY

### Lark Hoon Hwang (Member)



1981 : BS degree in Electrical Engineering, Myongji University.  
1983 : MS degree in Electrical Engineering.(Electric machine & Power electronics) Myongji University.  
1989 : PhD degree in Electrical Engineering(Electric machine & Power electronics), Myongji University.

Since 1991, he is an associate professor in the department of Electrical Engineering at Semyung University Che-Cheon Choong-Buk Korea. His primary research interests are compositeness development of the solar and wind in the area of substitute energy, power electronics application, power device and circuit simulation and electric machine system etc.