Regular paper | Journal of the KIECS. pp. 1099-1106, vol. 12, no. 6, Dec. 31 2017, t. 86, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2017.12.6.1099

DSP를 이용한 3상 태양광 인버터의 SPWM 전력변환기술에 대한 연구

김효성* · 유호성* · 이유정* · 정 훈* · 고윤석**

A Study on the SPWM based Power Conversion Technology of the Three-Phase Photovoltaic Inverter Using DSP

Hyo-Seong Kim* · Ho-Sung Yoo* · You-Jung Lee* · Hoon Jung* · Yun-Seok Ko**

요 약

본 논문에서는 신재생 에너지원인 태양광 발전을 위한 3상 인버터의 전력변환기술을 연구하였다. 태양광 인버터로는 정전압 공급 방식의 전압형 인버터, 제어기법으로는 SPWM 제어기법이 채택되었다. 태양광 인버터의 SPWM 제어기로는 강력한 고속 데이터 연산능력을 가지는 DSP가 채택되었으며, 배터리의 충전에 일정량의 전류를 공급하기 위해서 태양광 컨트롤러가 사용되었다. 끝으로, DSP를 주제어장치로 하는 소용량 3상 태양광 인버터 시스템이 시험, 제작되었으며, 실험을 통해서 SPWM 기반의 전력변환기능이 검증되었다.

ABSTRACT

In this paper, a three phase inverter control methodology for photovoltaic generation system, which is a renewable energy source, was studied. The voltage source inverter type of the constant voltage supply type was selected as the three phase photovoltaic inverter, and SWPM method was selected as control technique. a small capacity three phase photovoltaic inverter system, which has a DSP with powerful high speed data processing ability as the main controller and a solar controller as current controller to supply a certain amount of current to charge the battery, was made and tested for SPWM function.

키워드

Photovoltaic, DSP, LC Filter, Three Phase Inverter, CCS(Code Composer Studio)
태양광 인버터, 디지털 신호 처리기, LC 필터, 3상 인버터, 코드 콤포저 스튜디오

Ⅰ. 서 론

화석 에너지는 엄청난 양의 오염 물질을 배출해 인류의 생활 환경자체를 위협한다. 매장량도 한정되어, 사용 가능 기간이 제한되어 있다. 그래서 주목받는 것이 태양광 발전이다. 참고문헌 [1]에 따르면 화석 연료는 매장량이 앞으로 40~50년분 정도 남아 있는 유한한 연료인 반면 태양광 발전의 최대 특징은 그 에너지원이 무한하다는 점이다. 화력발전의 경우 연료의 에너지를 100이라 하면, 실제로 집에서 쓸 수 있는 전력은 35정도이다. 한편 태양광 발전의 경우에는 발전된 전력량 가운데 90%(나머지 10%는 직류를 교류로

* 남서울대학교 전자공학과(dnjswm0249@naver.com, jhoon92@nate.com, hosung200@naver.com, youjung4455@naver.com)
** 교신저자 : 남서울대학교 전자공학과
· 접 수 일 : 2017. 10. 27
· 수정완료일 : 2017. 11. 20
· 게재확정일 : 2017. 12. 15
· Received : Oct 27, 2017, Revised : Nov 20, 2017, Accepted : Dec 15, 2017
· Corresponding Author : Yun-Seok Ko
Dept. of Electronic Engineering, Namseoul University,
Email : ysko@nsu.ac.kr

변환할 때의 손실)을 가정에서 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 더불어 자원에너지의 고갈, 원자력 발전의 폐기물처리 등의 문제로 인해 신재생에너지원인 태양광 발전 시스템에 대한 관심이 고조됨에 따라 세계적으로 태양전지를 사용한 전력 시스템이 실용화 보급되고 있는 추세에 있다. 태양전지의 특성은 일사량, 온도 등에 크게 영향을 받기 때문에 가능한 한 많은 에너지를 얻기 위해서는 태양전지의 출력을 항상 최대로 제어할 필요가 있다. 기본적으로 태양광 발전의 출력은 직류이므로 교류부하에 사용하기 위해서는 직류를 정해진 크기와 주파수를 가지는 교류로 변환 시켜주는 제어기술이 필요하다[2-8].

따라서 본 논문에서는 신재생 에너지원인 태양광 발전을 위한 3상 인버터 제어 방법론이 연구된다. 태양광 인버터로는 정전압 공급 방식의 전압형 인버터, 제어기법으로는 SPWM 제어기법이 채택된다. DSP 기반의 SPWM 제어 기술이 연구되며, 배터리의 충전에 일정량의 전류를 공급하기 위해서 태양광 컨트롤러가 사용된다. 끝으로, DSP를 주제어장치로 하는 소용량 3상 태양광 인버터 시스템이 시험, 제작되며 SPWM 기반의 전력변환 기능이 검증된다.

II. 태양광 발전 시스템

태양광 발전 시스템이란 태양의 빛 에너지를 전기에너지로 변환하는 태양전지를 이용하여 전력을 생산하는 시스템으로 정의된다. 태양광 시스템은 태양전지를 직병렬로 구성한 모듈, 모듈을 조합한 어레이들로 구성된다. 태양전지는 일사량, 온도 등에 크게 영향을 받기 때문에 가능한 한 많은 에너지를 얻기 위해서는 그 출력을 항상 최대로 제어할 필요가 있다. 태양광 발전 시스템은 상용전력 계통과의 접속 방법에 따라 두 가지 시스템으로 분류된다. 양자가 전기적으로 항상 접속되어 있는 시스템을 병렬 연계 시스템이라 하고, 전기적으로 항상 분리되어 있다가 발전 전력이 부족할 경우에만 접속되는 시스템을 독립형 시스템이라 한다. 전자는 계통과 연계가 가능하게 하여 야간이나 태양광 발전 전력이 부족할 경우 계통 전압을 유입하여 사용하며, 잉여전력이 발생할 경우 계통에 역 전송이 가능한 시스템이고, 후자는 역 송전이 불가능하며 단순히 부하에만 전력을 공급할 수 있는 자가발전 시스템이다.

III. 3상 태양광 인버터 시스템

3상 태양광 인버터란 직류 링크단의 직류 전력을 계통의 교류 전력으로 변환 하는 장치이다. 고성능의 마이크로프로세서를 이용하여 높은 PWM 주파수를 이용해 스위칭 소자를 제어하여 크기와 주파수 조건을 만족하는 교류를 생성하게 된다[9-12].

3.1 3상 태양광 인버터 시스템 구성

그림 1은 태양광 시스템의 구성도를 보인다. 시스템 구성은 빛 에너지를 전기 에너지로 변환해주는 태양전지 모듈과 변화된 DC전력을 주 제어부인 컨트롤러를 사용하여 양방향성을 가지는 교류전력으로 변환 시켜주는 3상 인버터 모듈, 축전지에서 태양광 패널로 전류가 거꾸로 흐르지 않도록 역방향 전류의 흐름을 방지해 주어 변환된 일정한 량의 DC전력을 정상적으로 배터리에 저장시켜주는 솔라 제어기 그리고 3상 부하회로로 구성된다.

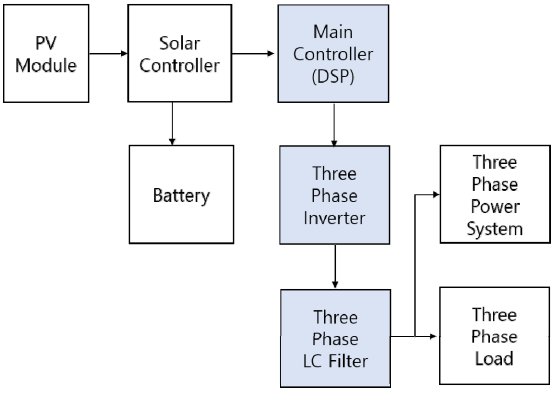

그림 1. 3상 태양광 인버터 시스템 구성

Fig. 1 The configuration of three phase photovoltaic inverter system

3.2 3상 전압형 인버터의 구조

그림 2는 3상 전압형 인버터의 대표적인 구조를 보인다. 6개의 스위칭 소자와 6개의 다이오드로 구성된

다. 주 제어기는 SPWM 파형으로부터 게이트 신호를 생성하여 상부 스위칭 소자들 M_A, M_B, M_C와 하부 스위칭 소자들 M_A^*, M_B^*. M_C^*의 게이트들에 인가함으로서 3상 교류 펄스파형을 생성하여 3상 LC필터에 공급, 궁극적으로 3상 정현파 파형을 얻게 된다. 이때 인버터의 상부 스위치들과 하부 스위치들은 암 단락을 막기 위해 반드시 식 (1)의 조건을 만족해야 한다. 즉 상부 스위치들 중 임의의 스위치가 ON 되었을 때 대응하는 하나의 하부 스위치는 반드시 OFF 상태를 유지해야 한다.

$$(M_1+M_1^*)=(M_2+M_2^*)=(M_3+M_3^*)=1 \quad (1)$$

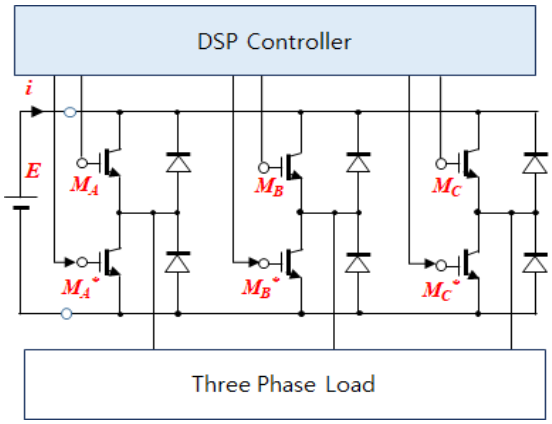

그림 2. 3상 전압형 인버터
Fig. 2 Three-Phase voltage source Inverter

3.3 3상 SPWM 제어 방법

SPWM은 디지털 제어가 활성화 되지 않은 아날로그 제어시기에 개발된 간단한 반송파 비교 방법이지만 그 편리성으로 인해 현재에도, 인버터 제어 방법으로 광범위하게 활용되고 있다. 3상 SPWM 방법에서 각 상의 기준파는 정현파를 사용하기 때문에 식 (2)와 같이 정의될 수 있다[13-15].

식 (2)로 표시되는 정현파 형을 가지는 각 상의 기준파 신호 r_A, r_B, r_C는 단위크기의 삼각파 c와 비교되는데, 각 상의 기준신호가 반송파 c보다 크면 1, 그렇지 않으면 0으로 변한다.

$$\begin{cases} r_A(\omega t)=\sin\omega t \\ r_B(\omega t)=\sin(\omega t+120^\circ) \\ r_C(\omega t)=\sin(\omega t+240^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

그림 3은 SPWM 파형을 보인다. 그림 3에서 펄스파형 a, b, c는 3상 인버터의 상부 스위칭 소자들 MA, MB, MC와 하부 스위칭 소자들 MA*, MB*. MC*의 게이트들에 인가되어 스위칭 소자들을 ON/OFF 함으로서 DC 전력으로부터 1단 또는 2단 레벨의 3상 펄스 파형들을 생성하게 된다.

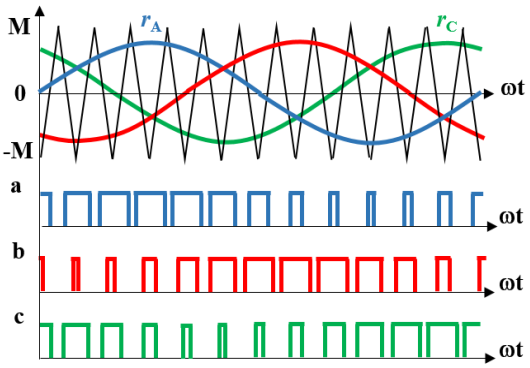

그림 3. SPWM 파형
Fig. 3 Waveform for SPWM

3.4 3상 필터

3상 전압형 인버터의 출력파형은 앞에서 설명된 바와 같이, 3상 펄스 파형을 가진다. 따라서 펄스파형을 정현 파형으로 변환하기 위한 필터가 설계돼야 한다. 이때 주파수 대역을 결정하기 위한 차단 주파수는 식 (3)과 같이 결정될 수 있다[16-17].

$$f_c=\frac{1}{2\pi RC} \quad (3)$$

IV. 3상 태양광 인버터 실험 제작

본 장에서는 앞에서 기술된 3상 태양광 인버터의 SPWM 이론을 기반으로 DSP를 이용하여 태양광 SPWM 인버터를 설계, 제작한 후, 실험을 통해서

SPWM 제어기술의 유효성을 확인한다.

4.1 3상 태양광 인버터 사양 설계

표 1은 본 논문에서 실험적으로 제작되는 3상 태양광 인버터의 사양 설계 결과를 보인다. 3상 태양광 인버터의 주제어기로는 현재 전력산업현장에서 전력설비 제어기로서 가장 일반적으로 사용되는 대표적인 DSP 기종인 TMS320F28335가 이용되었다. 그리고 인버터 설계에 있어 또 하나의 핵심적인 요소인 스위칭 소자는 부하전류 10A까지 스위칭이 가능하도록 100V, 10A(25°)의 정격 용량을 갖는 MOSFET IRF530로 하였다. MOSFET는 합리적인 가격으로 높은 스위칭 주파수를 얻을 수 있는 스위칭 소자이다. 그리고 태양광 패널에서 받은 DC 13V로부터 얻어지는 +6.5V를 MOSFET의 드레인 단자에, -6.5V를 소스 단자에 인가하고, 게이트 단자에는 DSP의 PWM 모듈을 사용해 3상 SPWM 파형을 발생시켜 넣어줌으로써, 3상 정현파가 얻어지도록 설계 하였다. 스위칭 주파수로는 합리적인 스위칭 손실 하에서 만족할 만한 출력품질을 얻을 수 있는 20kHz로 하였다. 그리고 부하전류는 2A가 얻어지도록 설계하였으며, 필터는 차단주파수가 723.43Hz가 되도록 식 (3)을 이용하여 R, C 값을 결정하였다.

표 1. 인버터 사양
Table 1. Specification of inverter

Components		Specification	Number
Main Controller		DSP TMS320F28335	1
Switching Device		Mosfet 100V, 10A	6
Resistor Load		50Ω, 50W	3
Battery		13V 5A	1
Switching Frequency		20kHz	-
Filter	Resister	1kΩ	3
	Capacitor	220nF	3

4.2 SPWM 알고리즘 구현

그림 4는 총 176개의 핀으로 구성된 DSP의 핀 배치도를 보이는데, 전원 핀, GPIO핀 그리고 ADC 핀들이 활용된다[1]. 특히 GPIO핀들은 스위칭 소자들의 게이트들에 스위칭 신호를 제공하기 위해 활용된다.

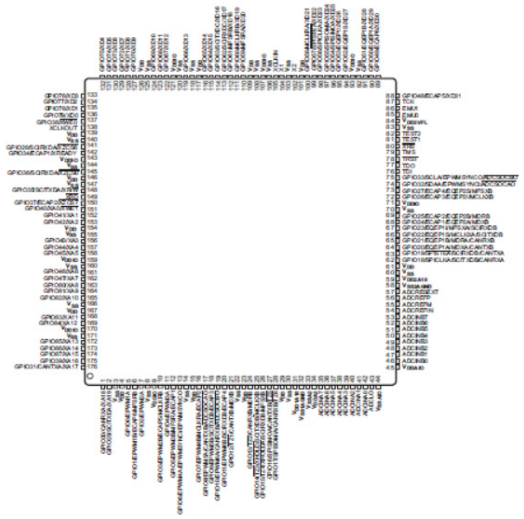

그림 4. DSP의 핀 배치
Fig. 4. The pin assignment of DSP

표 2는 SPWM 제어를 위해 사용된 레지스터들과 그들의 기능들을 각각 보인다.

표 2. 주요 레지스터의 명칭 및 기능
Table 2. Title and functions of prime registers

Register	Bit	Function
GPIO	Mux	Configure the GPIO pin *(bit 01 : using pin with output pwm wave)
EPwm	TBPRD	Determine the period of the time-base counter
	TBCTR	Gives the current time-base counter value
	CMPx	Continuously compared to the time-base counter
	CxU	Act when the counter equals the active CMPx register and the counter is incrementing
	CxD	Act when the counter equals the active CMPx register and the counter is decrementing

DSP를 이용한 SPWM 제어에 대한 전체 흐름도는 그림 5에 보이는데, PWM 제어 모듈을 이용하여

1) Texas Instrument, 2008

GPIO 핀을 설정한 후, 스위칭 주파수와 시스템 주차수 설정 그리고 시비율과 위상 제어를 통해 스위칭 신호를 스위칭 소자들의 게이트들에 발생시키는 6개의 절차들로 구성된다.

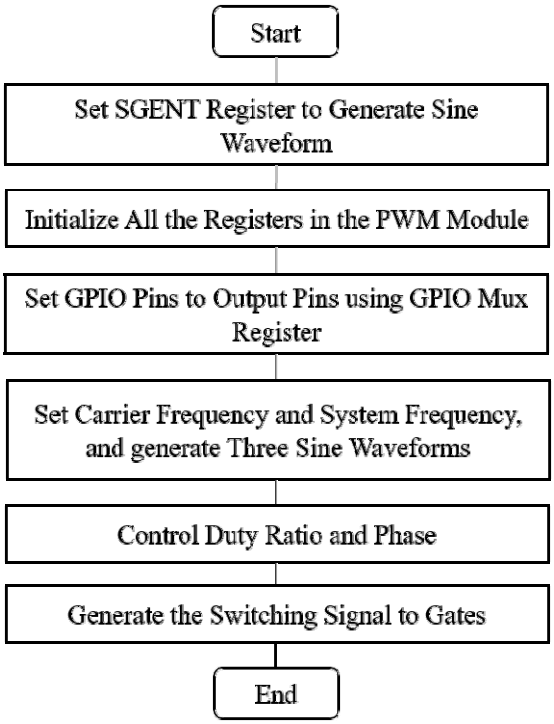

그림 5. SPWM 알고리즘
Fig. 5 SPWM algorithm

단계 1] 먼저, 정현파 기준 신호를 생성하기 위해 SGENT 레지스터를 설정한다.

단계 2] 생성된 정현파와 16 비트 타이머 카운터 값을 서로 비교하여 SPWM을 실현하기 위해 PWM 모듈에 있는 레지스터 값들을 재설정 해준다.

단계 3] 인버터를 제어하기 위해 사용 될 그림 5에 보이는 6개의 GPIO핀 (GPIO 0-5번 핀)을 PWM 출력 기능으로 사용하기 위해 GPIO Mux 레지스터를 이용해 출력 핀으로 설정한다.

단계 4] PWM 파형을 만들에 내는 과정에 있어 필요한 시스템 주파수와 캐리어 주파수 값을 MHz단위와 Khz 단위로 설정해 준다.

단계 5] 듀티 비와 위상을 제어 해주기 위해 EPwm 레지스터의 TBPRD(주기)와 CMPx(비교) 레지스터의 값을 정해줌으로서 PWM파형이 삼각파와 비교되어, SPWM의 형태로 출력 되게 된다. 그리고 발생 시간을 1/3씩 차이를 주어 각 상이 120° 차이가 나도록 설정해준다. 이때 필요한 경우 PWM 모듈의 설정 레지스터를 이용해 이득 값, 오프셋 및 데드밴드를 설정을 해준다.

단계 6] 마지막으로, 이때 출력 되는 신호는 스위칭 소자의 Gate로 들어가 ON/OFF를 반복하며 DC 전압의 크기 및 방향을 제어한다. 이 과정을 거치면 SPWM 파형으로 인해 노이즈가 섞인 AC 전력이 만들어진다. SPWM 제어 알고리즘은 CCS(Code Composer Studio)를 이용하여 구현되었다.

4.3 3상 태양광 인버터 실험 제작

그림 6은 표 1에 보인 3상 인버터 설계 규격에 따라 실험, 제작된 태양광 시스템의 실제 구성도를 보인다. 패널에서 생성된 DC전력은 컨트롤러를 통해 축전지에 저장 되고, 다시 컨트롤러를 통해 나온 DC전력은 부하로 흐르게 된다.

그림 6. 태양광 시스템
Fig. 6 Photovoltaic system

이때 전류량은 안전한 실험을 위해 저항을 10Ω에서50Ω으로 낮춤으로써 전류량을 1.2A에서 240mA로 낮추었다. 그림 7은 인버터에 MOSFET의 인가되는 전압을 제어하기 위해 게이트를 스위칭 하는 DSP에서 발생되는 시비율이 제어된 SPWM 파형이다.

인버터를 거친 후 저역통과필터에 의해 고주파가

제거된 60Hz AC전력을 그림 8을 통해 확인 할 수 있다. 3상 전체를 오실로스코프로 확인이 불가능해 a상과 b상을 대표적으로 보였는데, 두 파형들의 위상차가 120°임을 확인할 수 있다.

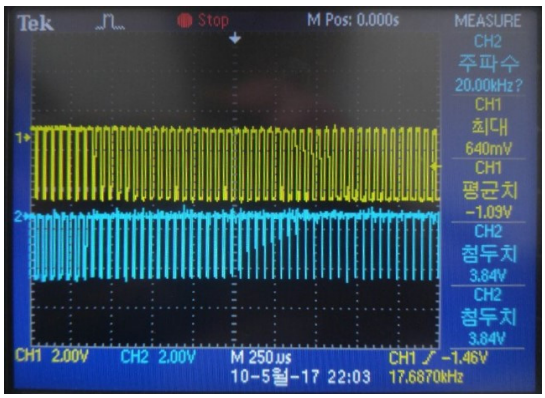

그림 7. 정현 PWM 파형
Fig. 7 Sinusoidal PWM Wave

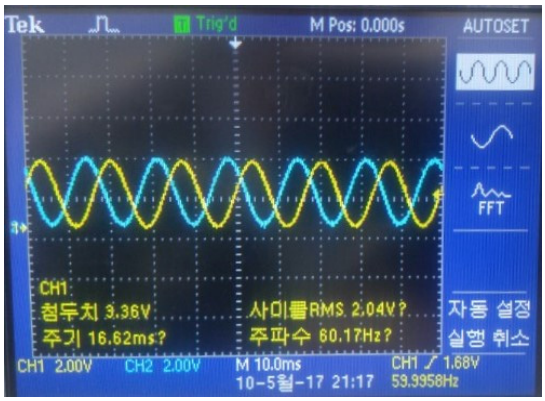

그림 8. 3상 AC 파형들 중 a와 b 상
Fig. 8 a and b waveform phase of the three phase waveform

4.4 실험 고찰

위의 실험에서는 태양광 발전 시스템을 제작함에 있어, 대용량 제작이 불가능해 소용량으로 제작을 하였다. 이 소용량 태양광 발전 시스템에 DSP를 사용해 3상 PWM 인버터를 제작하였으며, 먼저 태양광 패널과 배터리로부터 DC 전력 만들었고 이를 소용량 전력 범위로 맞추기 위해 권선 저항을 이용하여 낮추었다. 이 전력을 DSP의 PWM 기능과 3상 전압형 인버터를 통해 AC 전력을 만들었지만 노이즈가 많이 섞여있으며, 따라서 품질을 높이기 위해 다양한 필터를 사용해 보았다. 이를 통해 RC필터로 품질이 가장 우수한 3상 AC 전력을 얻을 수 있었다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 3상 태양광 인버터의 SPWM 제어 기술에 대해서 연구하였으며, 소용량의 3상 태양광 인버터를 설계, 실험 제작하였다. 인버터는 DSP 기반의 SPWM 전압형 인버터 방식으로 설계, 제작되었다. 그리고 제작된 3상 태양광 인버터 시스템에 대한 실험을 통해 SPWM 파형과 3상 AC 전력을 관찰함으로서 SPWM 기반의 전력변환 기술의 유효성을 확인할 수 있었다. 차후, 본 연구에서 확보된 DSP를 활용한 SPWM 전력변환 기초기술을 기반으로 실질적인 전력제어 및 계통연계 기술 개발에 대한 연구가 계속돼야 하겠다.

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음 (NRF-2016R1D1A1B01013749)

References

[1] J. Lee, Y. Kim, and S. Yoon, *Design of Renewable Energy System.* Seoul: Hongrung Publishing Company. Seoul, 2006.
[2] C. Smith, "Modeling and Control of a Six-Switch Single-Phase Inverter," Master's Thesis, *Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2005.
[3] M. Dave1 and S. Vyas, "Simulation and Modelling of Single Phase DC-AC Converter of Solar Inverter," *Int. Research J. of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 9, 2015, pp. 2225-2230.
[4] V. Sharma, R. Kumar, and N. Tripathi, "Current mode Controller Design for Single Phase Grid Connected Inverter Using Proportional Resonant Control Strategy," *Int.*

J. of Emerging Technologies and Engineering, vol. 2, no. 8, 2015, pp. 125-130.
[5] E. Román, R. Alonso, and P. Ibañez, "Intelligent PV Modules for Grid-Connected PV Systems," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, 2006, pp. 1066-1073.
[6] K. Han, R. Hwang, and S. Lee, *Power Electronics Engineering*. Paju: Hyungsul Publisher, 1996.
[7] J. Lai, "High-Efficiency Power Conversion for Renewable Energy and Distribution Generation," *2009 Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems*, Taipei, Taiwan, Nov. 2009.
[8] Y. Ko, S. Oh, H. Kim and I. Kim, "A Study on the Fault Analysis for a Micro Smart Grid Simulator Design Using MEMS' Miniaturization Technology," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 12, no. 2, 2017, pp. 315-324.
[9] I. Choi and S. Jung, "Modeling and Analysis of buck Converter in Photovoltaic System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 7, 2013, pp. 1039-1048.
[10] W. Do and Y. Chae, "Design of DC-DC Converter Controller using Analog Memory," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 3, 2015, pp. 357-364.
[11] C. Yoon, "A Study on the Design of High Efficiency Class E Power Amplifier and resonance Coil for High Efficient Wireless Power Transmission," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 10, 2016, pp. 935-940.
[12] J. Park, J. Shin, S. Ahn, H. Lim, and Y. Ko, "Design and Making of a Buck Converter For Smart Phone Wireless Charging," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 4, 2017, pp. 607-614.
[13] R. Panda and R. Tripathy, "A Simple and Efficient Symmetrical Hybrid Sine PWM Inverter for PV Power Cells," Master's Thesis, *Motilal Nehru National Institute of Technology, University of Allahabad,* 2006.
[14] Y. Ko, "A Study on the Voltage Control of a Single Phase Full-bridge Inverter using SPWM Driving Method," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 5, Oct. 2017, pp. 851-858.
[15] Andrzej M. Trzynadlowski, Introduction to Modern Power Electronics, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA., March. 2010,
[16] A. Ahmad, A. Abrishamifar, and M. Farzi, "A New Design Procedure for Output LC Filter of Single Phase Inverters," P*roc. of 2010 the Int. Conf. on Power Electronics and Intelligent Transportation System*, Shenzhen, China, vol. 3, Nov. 2010, pp. 86-91.
[17] P. A. Dahono, A. Purwadi, and Qamaruzzaman, "An LC Filter Design Method for Sngle-Phase PWM Inverters," *Proc. of 1995 the Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, Feb. 1995, pp. 21-24.

저자 소개

김효성(Hyo-Seong Kim)

2011년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중

정 훈(Hoon Jung)

2011년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중

유호성(Ho-Sung Yoo)

2014년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중

이유정(You-Jung Lee)

2014년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중

고윤석(Yun-Seok Ko)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업(공학사).
1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).
1986년～1996년 한국전기연구소 선임연구원.
1996년～1997년 포스코 경영연구소 연구위원.
1997년～현재 남서울대학교 전자공학과 교수.
2012년～2013년 University of Utah 방문교수
※ 관심분야 : 전력시스템 자동화, 배전자동화, 스마트그리드, 주택자동화, 인공지능, 로봇제어