

FPGA를 이용한 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템의 POS MPPT 제어

논 문
61-1-13

FPGA based POS MPPT Control for a Small Scale Charging System of PV-nickel Metal Hydride Battery

이 효 근* · 서 효 룡** · 김 경 훈** · 박 민 원† · 유 인 근***
(Hyo-Guen Lee · Hyo-Ryong Seo · Gyeong-Hun Kim · In-Keun Yu · Minwon Park)

Abstract - Recently, the small scale photovoltaic (PV) electronic devices are drawing attention as the upcoming PV generation system. The PV system is commonly used in small scale PV applications such as LED lighting and cell phone. This paper proposes photovoltaic output sensorless (POS) maximum power point tracking (MPPT) control for a small scale charging system of PV-nickel metal hydride battery using field-programmable gate array (FPGA) controller. A converter is connected to a small scale PV cell and battery, and performs the POS MPPT at the battery terminal current instead of being at the PV cell output voltage and current. The FPGA controller and converter operate based on POS MPPT method. The experimental results show that the nickel metal hydride battery is charged by the maximum PV output power.

Key Words : Energy storage system, Grid-connected operation mode, Islanded operation mode, Microgrid

1. 서 론

최근 화석 연료 사용 증가로 인한 환경문제가 국제적으로 관심을 받고 있다. 또한 화석 연료의 가격 상승과 고갈이 우려되는 상황에서 신 재생에너지 자원을 기반으로 하는 산업 개발과 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 태양광 발전 시스템은 태양 에너지를 직접적으로 사용하여 무한대의 에너지원을 가지고 있을 뿐만 아니라, 다른 신 재생에너지 산업에 비해 시스템 유지 및 보수가 쉬우며, 시스템 발전 시 소음이 발생하지 않아 설치 장소에 대한 제약이 적다는 장점을 가지고 있다 [1-2].

태양광 발전 시스템은 크게 대규모 태양광 발전 시스템 단지와 일반 주택에 설치된 주택용 태양광 발전 시스템 그리고 소형 전기기기에 사용되는 소형 태양광 발전 시스템이 있다. 특히 소형 태양광 발전 시스템의 경우 휴대가 간편하여 핸드폰이나 LED 조명 기기의 충전 장치에 대한 개발과 연구가 활발하게 진행 되고 있다 [3].

태양광 발전 시스템의 생산 전력은 일사량과 태양광 셀 표면 온도의 영향을 받지만 태양광 셀 출력 전압에 의해 생산 전력이 결정되기 때문에 태양광 셀의 전압과 전류를 측정하여 최대 전력을 생산하도록 제어한다 [2, 4, 5]. 이를

maximum power point tracking (MPPT) 제어라고 하며, MPPT 제어의 여부와 방법에 따라 같은 일사량과 태양광 셀 표면 온도에서도 태양광 발전 시스템 출력은 급격한 차이를 보인다. 이러한 이유로 태양광 발전 시스템에서 최대 전력을 생산하기 위해 다양한 MPPT 제어 방법이 연구 개발되고 있다. MPPT 제어 방법 중 일반적으로 사용되는 방법은 태양광 셀 출력 전압과 전류를 측정하고 태양광 발전 시스템의 컨버터를 제어하여 출력 전압을 변화시켜 최대 전력이 생산 되도록 추종하는 제어 방법이다. 이 제어 방법은 제어 알고리즘이 복잡하고 태양광 셀 출력 측에 전압과 전류 센서가 필요하다는 문제점을 가지고 있다 [5-9].

이런 문제점을 해결하기 위해 방법으로는 PV output sensorless (POS) MPPT 제어 방법을 제안 할 수 있다. POS MPPT 제어 방법은 태양광 발전 시스템의 컨버터 출력 전류만을 측정하여 그 값으로 시스템을 제어하기 때문에 제어 알고리즘이 간단하고 태양광 셀 출력 전압과 전류 센서가 없어도 제어가 가능하기 때문에 태양광 시스템의 전체 가격이 저렴해지고 크기를 소형화 할 수 있다. 특히 소형 태양광 발전 시스템은 센서와 제어회로가 차지하는 부피와 제작 비용이 크기 때문에 소형 태양광 발전 시스템에 POS MPPT 제어 방법을 사용할 경우 보다 큰 장점을 가지게 된다 [8-10].

본 논문에서는 POS MPPT 제어 방법을 이용하여 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템을 설계 제작하고 소형 태양광 발전 시스템에서 생산되는 최대 전력을 니켈 수소 전지에 충전하였다. 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템은 태양광 셀, DC-DC buck 컨버터, 니켈 수소 전지로 구성되었으며, field-programmable gate array (FPGA)를 이용하여 POS MPPT 제어 방법으로 운전 하였

* 준 회원 : 창원대 공대 전기공학과 석사과정
** 정 회원 : 창원대 공대 전기공학과 박사과정
*** 시니어회원 : 창원대 공대 전기공학과 교수
† 교신저자, 정회원 : 창원대 공대 전기공학과 교수
E-mail : paku@changwon.ac.kr
접수일자 : 2011년 9월 18일
최종완료 : 2011년 11월 16일

다. 실험 결과는 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템에서 FPGA를 이용하여 POS MPPT 제어가 운전하여 최대 전력을 생산 충전하는 것을 보여준다.

2. 본 론

2.1 POS MPPT 제어 알고리즘의 적용한 태양광 발전 전지 충전 시스템

(1) 태양광 발전 전지 충전 시스템의 특성

태양광 발전 전지 충전 시스템의 POS MPPT 제어 방법을 알고리즘의 장점은 전지의 입력 전류 하나만을 피드백하여 DC-DC컨버터를 통해 MPPT 제어 운전을 할 수 있는 것이다. 그 결과 제어 알고리즘과 회로가 간단해 지는 장점을 가진다. 그림 1은 태양광 발전 전지 충전 시스템의 운전 특성을 보여 준다. 그림 1과 같이 태양광 셀의 생산되는 전력이 최대 일 때 태양광 셀에 전압과 전류는 각각 최대 값이 아니다. 태양광 셀의 특성은 식 (1)과 같이 비선형 적이다. 일반적으로 MPPT 제어 방법은 태양광 셀의 출력 전압과 전류를 곱을 통해 생산되는 전력 값이 구해진다. 각각의 최대 값은 식 (2)와 같이 태양광 셀의 최대 전력이 아니라, 태양광 셀의 최대 전력 값은 식 (3)과 같이 전지 입력 전류 값에 비례하고 전지 전력 값에 비례한다. 전지 전압은 미세하게 때문이다.

이 이론을 볼 때 전지 입력 전류 값이 최대 값이며, 태양광 셀에 생성되는 전력 최대 값이 된다. 이를 이용하면 전지의 입력 전류 하나만을 측정 계산하여 POS MPPT 제어가 가능하고 태양광 셀 출력 전압과 전류 센서가 필요 없이 MPPT 제어가 가능하다.

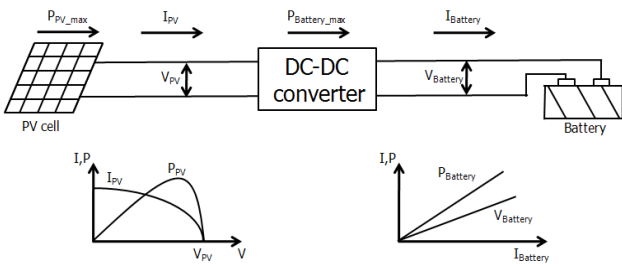


그림 1 태양광 발전 시스템의 셀과 컨버터 출력 전력의 특성
Fig. 1 Characteristics of PV cell and converter output power

$$I = I_{sc} - AT^n \exp\left(\frac{-E_g}{nkT}\right) \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right] - 1 - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$P_{PV,max} \approx V_{PV} \times I_{PV} \quad (2)$$

$$P_{PV,max} \propto P_{load,max} \times I_{load,max} \quad (3)$$

(2) POS MPPT 제어 알고리즘의 특성

그림 2의 (a), (b)와 같이 POS MPPT 제어는 DC-DC converter 출력 전류를 측정하여, DC-DC converter의 duty

rate를 변화를 주어 변화 된 duty rate에 따른 전류를 측정하여 그 값이 최대 전류 점으로 추종 제어한다. 그림 2의 (a)의 제어 알고리즘과 표 1의 방법으로 POS MPPT 제어를 할 경우 그림 2의 (b)와 같이 최대 전력 점으로 추종 제어하게 되며 본 실험은 duty rate는 한 번 동작 시 0.02만큼 변화되고 50 msec 마다 운전하도록 제어 운전 하였다.

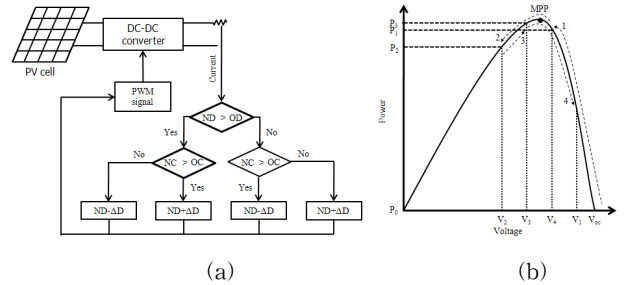


그림 2 (a) POS MPPT의 블록 다이어그램, (b) POS MPPT 제어를 이용한 전력-전압 특성 곡선

Fig. 2 (a) Block diagram of PV POS MPPT control, (b) POS MPPT control using P-V characteristic curve

표 1 독립 운전 모드 시뮬레이션 조건

Table 1 Conceptual explanation of POS MPPT control method

Track	Duty	Current	Δ Duty
1(V _{oc} → V ₁)	(-)	(+)	(-)
2(V ₁ → V ₂)	(-)	(-)	(+)
3(V ₂ → V ₃)	(+)	(+)	(+)
4(V ₃ → V ₄)	(+)	(-)	(-)

2.2 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템의 구성

(1) DC-DC buck 컨버터

그림 3은 DC-DC 컨버터와 전지 시스템의 연결을 나타낸 등가 회로이다. DC-DC buck 컨버터의 출력 전압과 전류는 duty rate로 결정되며, 이 점을 이용하여 태양광 발전 전지 충전 시스템을 제어가 가능하다. 이 시스템에서 DC-DC buck 컨버터 출력 전압은 전지 출력 전압과 같고 전지 전압을 미세하게 변하기 때문에 최대 전류를 생산하도록 운전하여, 최대 전력이 전지에 충전이 가능해 진다.

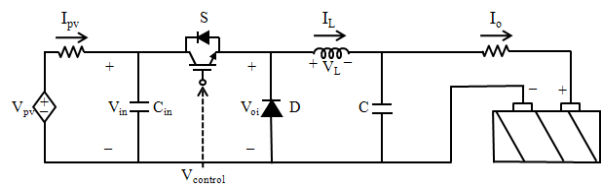


그림 3 DC-DC 컨버터와 전지 시스템의 등가 회로

Fig. 3 Equivalent circuit of the DC-DC converter with battery system

(2) 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템의 블록 다이어그램

그림 4은 FPGA를 이용한 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템의 POS MPPT 제어 방법을 블록 다이어그램을 보여준다. 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템은 FPGA를 통해 운전되며 DC-DC 컨버터 출력 전류를 측정하여 POS MPPT 제어 알고리즘으로 그 값을 비교하여 DC-DC 컨버터 출력 전류 값이 최대가 되도록 MOSFET에 PWM 신호를 보내주어 제어하였다. 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템이 최대 전력을 생산 충전하기 위해서는 태양광 셀에서 최대 전력을 생산하여야 한다. 니켈 수소 전지에 전력을 충전 할 경우 니켈 수소 전지의 단자 전압 값은 미세하게 변하기 때문에 입력 전류 값에 의해서 충전되는 전력 값이 결정된다. 니켈 수소 전지에 충전되는 전류 값이 최대 일 때, 충전 전력이 최대가 되고, 태양광 셀에서 생산되는 전력 값이 최대가 된다. 이와 같은 이론으로 POS MPPT 제어 알고리즘이 실행된다.

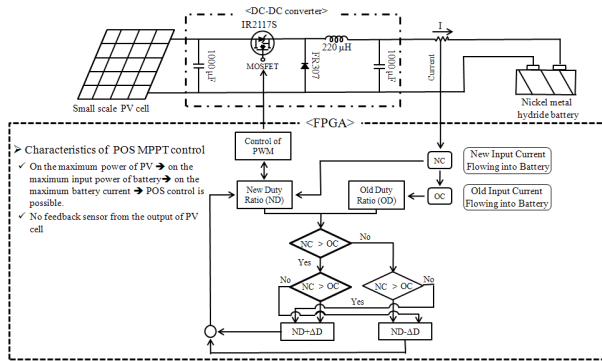


그림 4 태양광 발전 니켈 수소 전지 시스템 제어 블록 다이어그램

Fig. 4 Block diagram PV-nickel metal hydride battery system control

그림 5는 POS MPPT 제어의 적용한 순서도이다. 그림 5와 같은 과정으로 DC-DC buck 컨버터 출력 쪽의 전지 전류를 측정하여 그 값의 50 msec 동안 평균화 하여 그 값을 시간마다 비교하여 최대 전류가 충전 되도록 DC-DC buck 컨버터에 PWM 신호를 보내어 준다. 이와 같은 순서로

POS MPPT 제어 운전이 FPGA를 통해 이루어진다. 표 2는 태양광 발전 전지 충전 시스템의 태양광 셀, FPGA 컨트롤러와 전지의 파라미터 값을 나타내었다.

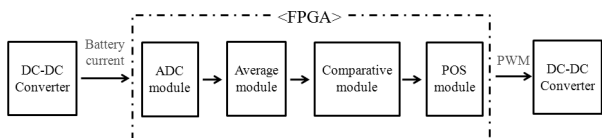


그림 5 FPGA를 이용한 POS MPPT 제어 방법의 다이어그램
Fig. 5 Diagram of POS MPPT control method using FPGA

표 2 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템의 파라미터

Table 2 Parameter of small scale charging system of PV-nickel metal hydride battery

System	Parameter	Date
PV cell	Maximum power point	1.5 W
	Maximum voltage point	3 V
FPGA	Model	EP1C6Q230
	ADC scale	8bit ADC
Battery	Voltage	1.2 V
	Capacitance	2000 mAh

(3) 시스템 제작

그림 6은 태양광 발전 전지 충전 시스템을 실험하기 위해 설계 제작 된 DC-DC buck 컨버터. 태양광 셀, FPGA 와 니켈 수소 전지이다. 본 시스템들을 운전하여 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템을 제작하여 실제 일사량 조건에서 운전 하였다. DC-DC buck 컨버터의 회로의 용량은 그림 4에 나와 있다.

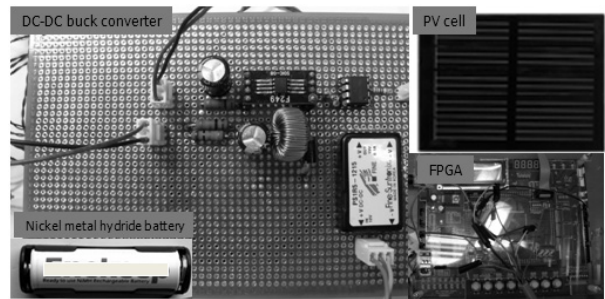


그림 6 태양광 발전 니켈 전지 충전 시스템의 실험 장비

Fig. 6 Experiment equipments of charging system of PV-nickel metal hydride battery

3. 실험 결과

그림 7은 실제 기상 조건에서 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템의 POS MPPT 제어 운전 시, 태양광 셀에서 생산되는 전압과 전력 사이의 관계를 나타내는 그래프이다. 이 시스템은 FPGA 컨트롤러를 통해 POS MPPT 제어로 운전되고 있으며, 이로 인해 태양광 셀에서 나오는 출력 전력은 MPPT 제어에 따라 최대 전력 점에서 운전 된다. 또한 태양광 셀에 그림자가 생기게 하여 일사량을 떨어뜨릴 경우에도 떨어진 일사량에 해당하는 최대 전력 점을 추종하고 있음을 알 수 있다.

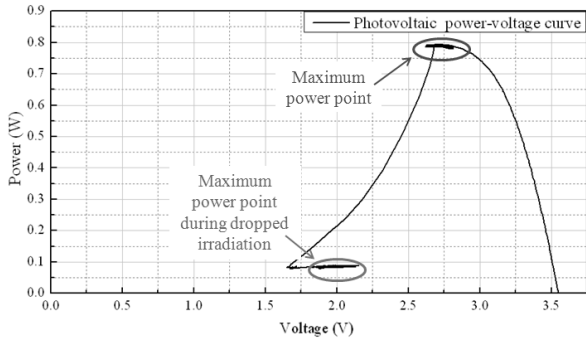


그림 7 POS MPPT 전력-전압 실험 결과 그래프
 Fig. 7 Experimental results of POS MPPT P-V curve

그림 8은 실제 기상 조건에서 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템에서 생산되는 전압과 전류를 시간에 따라 관찰한 그래프이다. 그림 8과 같이 태양광 셀의 출력 전압과 전류가 약 3.5 V, 0 A에서 20초 후에 FPGA가 POS MPPT 제어를 동작하게 되면, 태양광 셀의 출력 전압과 전류는 실제 기상 조건하에서의 최적 점으로 추종한다.

큰 일사량 변화 없이 MPPT 제어 운영을 하는 도중 75초 지점에서 그림자를 발생시켜 일사량을 떨어뜨렸고, 이로 인해 태양광 셀에서 생산되는 전력이 감소하였지만, 떨어진 일사량 조건에서 최대 전력 점으로 추종 제어를 하고 있다. 그림 8의 그래프를 볼 때 POS MPPT 제어가 운전 되고 있음을 알 수 있다.

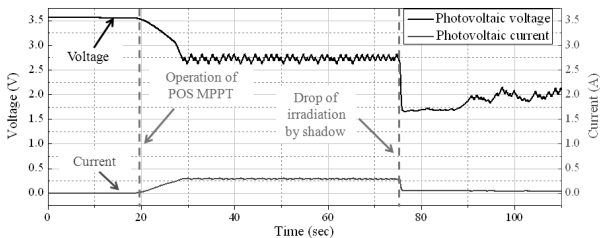


그림 8 태양광 시스템의 출력 전압과 전류
 Fig. 8 Output voltage and current of PV cell

그림 9는 실제 기상 조건에서 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템의 POS MPPT 제어 운전 시, 니켈 수소 전지의 입력 전압과 전류를 시간에 따라 측정된 그래프이다. 그림 9와 같이 20초에서 FPGA가 POS MPPT 제어 동작하면 태양광 셀에서 생산되는 전력이 니켈 수소 전지에 흐르게 되고 단자 전압을 경우 미세하게 변하기 때문에 입력 전류가 최대 점으로 추종하여 충전하게 된다.

큰 일사량 변화 없이 POS MPPT 제어 운영을 하는 도중 75초 지점에서 그림자를 발생시켜 일사량을 떨어뜨렸고, 이로 인해 니켈 수소 전지의 입력 전류는 줄어들기는 했지만, 감소한 일사량에 의한 니켈 수소 전지 입력 전류가 최대 점으로 추종 충전하고 있다. 그림 9는 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템이 POS MPPT 제어 되어 최대 전력을 니켈 수소 전지에 충전하고 일사량 변화에도 태양광 셀에서 생산되는 최대 전력을 충전 하고 있음을 보여준다.

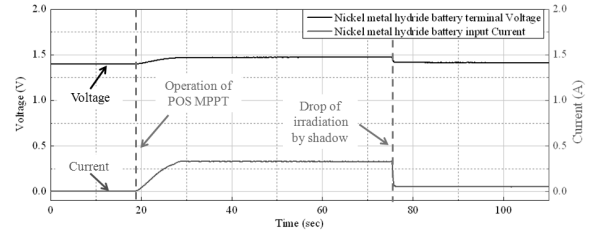


그림 9 니켈 수소 전지의 단자 전압과 입력 전류
 Fig. 9 Terminal voltage and input current of nickel metal hydride battery

그림 10은 실제 기상 조건에서 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템을 FPGA를 이용하여 POS MPPT 제어를 30분 동안 운전 시켜 니켈 수소 전지의 단자 전압과 입력 전류 값을 측정된 그래프로 장시간 운전 시 동작을 알아보고 FPGA 컨트롤러가 POS MPPT 제어 운영을 멈춘 후와 동작을 시작한 지점의 전압 차이를 측정하여 니켈 수소 전지가 30분 동안 충전 정도를 알 수 있다. 니켈 수소 전지의 단자 전압은 충전 전류에 비례적으로 증가하며, 니켈 수소 전지의 단자 전압은 30분 경과 후 1.43 V 로 증가하였다. 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템은 30분 동안 POS MPPT 제어 운영을 하여 니켈 수소 전지의 전압을 약 0.05 V 상승시켰고, 니켈 수소 전지의 충전 특성 곡선에 비교해 본 결과 30분 동안 state of charge 값이 약 0.4에서 약 0.7 까지 충전 된 것을 알 수 있었다.

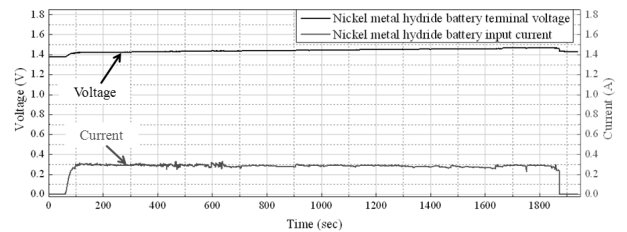


그림 10 니켈 수소 전지의 단자 전압과 입력 전류, 장시간 결과 그래프
 Fig. 10 During long term, results of terminal voltage and input current of nickel metal hydride battery

4. 결 론

본 논문에서는 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템을 POS MPPT 제어를 FPGA를 이용하여 제어하였다. POS MPPT 제어는 제어 알고리즘이 간략하고 태양광 셀의 출력 전압과 전류를 센서의 사용하지 않고 제어가 가능한 장점을 가지고 있기 때문에 태양광 발전 시스템에 유용하게 쓰이며, 대규모 시스템 보다는 제어 시스템과 센서의 부피와 제작 가격을 많이 차지하는 소형 태양광 발전 시스템에 사용하는 경우에 장점이 더욱 부각 된다.

소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템의 POS MPPT 제어 운영의 결과로 태양광 셀은 일사량에 따른 최대 전력을 생산하고, 생산된 최대 전력은 니켈 수소 전지에 충전 된다. 태양광 셀에 그림자를 생기게 하여 다양한 일사

량 조건에서 실험을 하였고, 장시간 운전 시의 제어 운전 결과를 알 수 있었다. POS MPPT를 증명하기 위해 태양광 셀, DC-DC buck 컨버터 그리고 니켈 수소 이온 전지로 구성된 소형 태양광 발전 니켈 수소 전지 충전 시스템을 설계 제작하여 실제 기상조건에서 FPGA를 이용하여 제어 실험한 결과 본 시스템은 최대 전력을 생산하고 전지에 최대 전력을 충전하는 것을 확인했다.

감사의 글

This work was sponsored by ETRI System Semiconductor Industry Promotion Center, Human Resource Development Project for SoC Convergence.

참 고 문 헌

[1] Riza M, "A maximum power point tracking for photovoltaic-SPE system using a maximum current controller," *Solar Energy Materials & Solar cells*, vol. 75, pp. 697-706, Mar. 2003

[2] Seok-ju Lee, Minwon Park and In-keun Yu "The Experimental Analysis of the Grid-connected PV System Applied by POS MPPT," *Electrical Machines and system*, 2007. *ICEMS. International Conference on*, pp.1786-1791, Oct. 2007

[3] W. Xiao, M. G. J. Lind, W. G. Dunford, and Am Capel "Real-time identification of optimal operating point in photovoltaic power system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 1017-126, Jun. 2007

[4] Sang Young Kim, Minwon Park and In-keun Yu "An Effective POS MPPT control Method for PV power Generation," *Electrical Machines and system*, 2009. *ICEMS. International Conference on*, Nov. 2009

[5] Sang Soo Park, Minwon Park and In-keun Yu "Hardware Implementation of Optimization Technique based Sensorless MPPT Method for Grid-connected PV Generation System," *Electrical Machines and system*, 2009. *ICEMS. International Conference on*, Nov. 2009

[6] L. Egiziano and N. Femia "Design and Optimization of a Maximum Power Tracking controller for a PV battery charger," *IEEE Trans. on industry applications*, vol. 31, no. 2, Mar/April 2007

[7] W. Xiao, N. Ozog, and W. G. Dunford, "Topology study of photovoltaic interface for maximum power point tracking," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 3, pp. 1696-1704, Jun. 2007

[8] N.Mutoh, M. Ohno, and T. Inoue, "A method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1055-1065, Jun. 2006

[9] T. Esum, P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques" *IEEE, Trans. Energy Conversion*, Vol.

22, No.2, pp. 439-449, June 2007

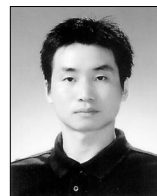
[10] M. Park, and IK. Yu, "A Novel Real Time Simulation Technique of Photovoltaic Generation Systems using RTDS", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 19, No. 1, pp.164-169, 2004

저 자 소 개



이 호 근 (李孝根)

1984년 10월 25일생. 2010년 창원대학교 전기공학과 졸업, 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정



서 호 룡 (徐孝龍)

1980년 10월 27일생. 2006년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



김 경 훈 (金慶勳)

1982년 10월 1일생. 2006년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2006년 8월 ~ 2007년 2월 한국전기연구원 신재생 에너지그룹 위촉연구원, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



박 민 원 (朴敏遠)

1970년 2월 12일생, 1995년 창원대 전기공학과 졸업, 2002년 일본 오사카대학 대학원 전기공학과 졸업(공학석사, 공학박사), 2001년 10월 ~ 2004년 8월 한국 전기연구원 차세대 초전도 응용기술 개발사업단 기술팀장, 2004년 9월~현 창원대학교 전기공학과 부교수



유 인 근 (劉仁根)

1954년 2월 18일생, 1981년 동국대학교 졸업, 1983년 한양대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년 6월 ~ 1988년 2월 한국 전기연구원 선임연구원(지중송전연구실장), 1988년 3월~현 창원대학교 전기공학과 교수