

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.3.129>

JIIBC 2020-3-18

SoC 기반 보급형 MiC 스마트 태양광발전시스템 기술개발

Technology Development of Entry-Level MiC Smart Photovoltaic System based on SOC

윤용호*

Yongho Yoon*

요약 최근 태양전지 모듈 내부에 습기 침투 및 EVA Sheet의 배부름 현상, 프레임 Seal이 녹아내리는 현상, 설치 후 1년 지난 모듈에서 발전성능이 저하되는 현상 등이 발생하고 있다. 국내에 5~7년 이전에 설치된 태양전지 모듈에서 백화현상 및 전극 부식 현상, 절연파괴 현상 등이 나타나기 시작하여 발전성능 저하로 이어지고, 장기 신뢰성 및 장수명 기술에 대한 커다란 문제점이 대두되고 있다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해 태양전지 모듈의 내구성 확보 및 노화 진행을 모니터링할 수 있는 기능을 포함하는 마이크로 인버터 (MiCrco Inverter Converter, 이하 MiC) 개발 및 MiC에서 모니터링 데이터를 기반으로 태양전지 모듈의 노화를 판단할 수 있는 스마트 모니터링 프로그램이 제시되고 있다. 또한, 태양전지 모듈의 모니터링 기능을 강화한 MiC와 IT 융합을 통한 체계적 운영 관리를 통한 고효율 태양광 스마트 감시 시스템이 되기 위해서는 MiC 내의 SoC (System On Chip)는 태양전지 모듈에 대한 환경정보를 복합적으로 감지하고 필요시 통신 및 제어를 수행할 수 있는 기능들이 요구되고 있다. 이러한 요구사항들을 기반으로 본 논문에서는 SoC 기반 보급형 MiC 스마트 태양광발전시스템 기술개발을 목적으로 연구하고자 한다.

Abstract Moisture infiltration inside the solar cell module, filling of EVA sheet, melting of the frame seal, and deterioration of power generation performance in the module one year after installation are occurring. Whitening phenomenon, electrode corrosion phenomenon, and dielectric breakdown phenomenon are appearing in solar cell module installed in Korea before 5-7 years, leading to deterioration of power generation performance, and big problems for long-term reliability and long life technology are emerging. Therefore, in order to solve these problems, the development of a micro inverter (MiCrco Inverter Converter, MiC) including the function of securing the durability of the solar cell module and monitoring the aging progress and the solar cell based on the monitoring data from the MiC smart monitoring programs have been proposed to determine the aging of modules. In addition, in order to become a highly efficient solar smart monitoring system through systematic operation management through IT convergence with MiC that has enhanced monitoring function of solar cell module, SoC(System On Chip) in micro inverter is the environment for solar cell module. There is a demand for functions that can detect information in a complex manner and perform communication and control when necessary. Based on these requirements, this paper aims to develop SoC-based low-cost MiC smart photovoltaic system technology.

Key Words : Smart Photovoltaic System, SoC (System On Chip), MiCrco Inverter Converter (MiC),

*정회원, 광주대학교 전기전자공학부
접수일자: 접수일자 2020년 1월 27일, 수정완료 2020년 5월 1일
게재확정일자 2020년 6월 5일

Received: 27 January, 2020 / Revised: 1 May, 2020 /
Accepted: 5 June, 2020

*Corresponding Author: yhyoon@gwangju.ac.kr
School of Electrical and Electronic Engineering,
Gwangju University, Gwangju, Korea

I. 서 론

태양광발전시스템의 에너지 효율 향상 및 원가 절감을 위해 국내외 민간/공공단체에서는 각 모듈 (Cell/PCS/ESS) 단위의 발전효율 향상에 집중하고 있지만, 태양전지 모듈 단위로의 효율 향상에는 한계를 보이는 실정에서 태양광에너지 사용에 있어 효율을 향상시킬 수 있는 새로운 접근이 필요하다. 그러나 기존의 태양광발전시스템에서는 태양전지 모듈 (PV Module) Array (태양전지 모듈을 여러 개 직렬로 연결된 군)에서만 이상 유무를 검출하기 때문에 태양전지 모듈 고장 시 직접적으로 어떤 모듈이 고장이 발생하였는지 알 수가 없는 상황이다.

현재 태양전지 모듈의 수명은 설치방식 및 설치환경에 따라서도 내구성에 문제점을 나타내고 있지만, 구성 재료 및 제조공정에 따라서 많은 문제점이 제기되고 있다. 그동안 태양전지 모듈 성능평가 기준 확립 및 인증제도에 의해 엄격한 심사기준으로 보급 사업에 설치되고 있지만, 현재까지 설치된 태양전지 모듈은 내구성 평가를 수행하지 못하고, 발전성능에만 의존되어 설치 및 보급되고 있다. 이에 여러 연구기관에서 태양전지 모듈의 장기수명을 위한 재료 및 제조기술에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있지만, 운송 중에 미세하게 파손되는 부분과 태양전지 모듈 제조 시 찾지 못하는 Micro Crack 등이 불과 몇 년도 되지 않아 많은 문제점을 들어낸다. 이러한 문제점들로 인해 태양광발전시스템 (PV System)이 정상적으로 동작하지 않아 발생하는 경제적 손실을 줄여야 하고, 오동작으로 인하여 시스템에 무리를 줄 수 있는 문제점 신속하게 제거해야 한다.

따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해 태양전지 모듈의 내구성 확보 및 노화 진행을 모니터링할 수 있는 기능을 포함하는 마이크로 인버터 (MiC)ro Inverter Converter, 이하 MiC) 개발 및 MiC에서 모니터링 데이터를 기반으로 태양전지 모듈의 노화를 판단할 수 있는 스마트 모니터링 프로그램이 제시되고 있다^[1]. 또한, 태양전지 모듈의 모니터링 기능을 강화한 MiC와 IT 융합을 통한 체계적 운영 관리를 통한 고효율 태양광 스마트 감시 시스템이 되기 위해서는 MiC 내의 SoC (System On Chip)는 태양전지 모듈에 대한 환경정보를 복합적으로 감지하고 필요시 통신 및 제어를 수행할 수 있는 기능들이 요구되고 있다^[2].

이러한 요구사항들을 기반으로 본 논문에서는 SoC 기반 보급형 MiC 스마트 태양광발전시스템 기술개발을 목적으로 연구하고자 한다.

II. 태양전지 모듈 노화 현상 및 문제점

태양전지 모듈의 선행 노화 조사 사례 중 하나는 마라도에서 약 15년 동안 사용된 태양전지 모듈로써, 48W급 다결정 실리콘 태양전지 모듈이다. 선행조사 Site에서 채취된 10개의 태양전지 모듈에 대한 발전성능으로 10개의 시료에서 2개의 시료는 36.0W, 38.3W로써 초기 출력보다 약 20% 이상의 출력 감소 특성을 나타내었으며, 나머지 8개의 시료는 41.8~44.1W로써 13% 이하의 출력 감소 특성을 그림 1에서 보여주고 있다.

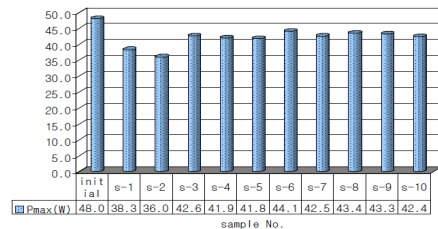


그림 1. 대상 시료의 최대출력 특성 비교

Fig. 1. Comparison of maximum output characteristics of target samples

그림 2는 국내외에 설치된 태양전지 모듈의 다양한 노화 현상들로, 이러한 태양전지 모듈은 불과 설치된 지 5년~15년밖에 되지 않는 제품으로써, 노화 현상들을 살펴보면, 제조사에 따라서 특징적인 노화 현상들을 발견할 수 있다.

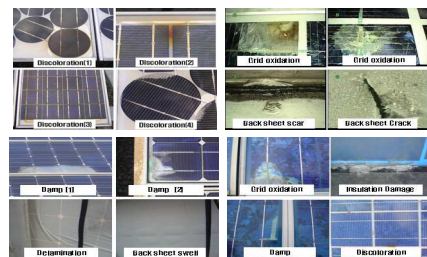


그림 2. 태양전지 모듈의 노화 사례

Fig. 2. Aging case of PV module

그림은 3은 노화 시료가 존재하고 있는 Array군을 열화상 카메라를 이용하여 태양전지 셀의 열화 특성을 분석한 결과로 태양전지 모듈 내부 특정 태양전지 셀에는 주변 태양전지 온도보다 약 30°C 이상 높은 온도 특성을 보여주고 있으며, 이러한 결과로 볼 때 특정한 노화 시료의 비정상적인 운전특성으로 주변의 태양전지 모듈 또는 태양전지 셀에 노화를 가속하는 주된 원인이 되고 있다.

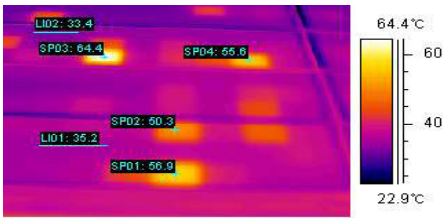


그림 3. 태양전지 모듈의 열 특성 분석
 Fig. 3. Thermal characteristic analysis of PV module

표 1. 18개월 사용된 태양전지 모듈의 발전성능 분석
 Table 1. Analysis of power generation performance of PV modules used for 18 months

측정종류	단위	0021		0155		0231		nominal
		initial	after	initial	after	initial	after	
개방 전압(Voc)	V	36.60	36.10	36.90	36.20	36.80	36.10	36.80
단락전류(Isc)	A	4.97	4.97	5.03	4.96	4.97	4.86	4.97
최대출력(Pmax)	W	132.0	129.9	135.9	131.9	135.6	130.9	145.0
최대전압(Vmp)	V	29.00	28.60	29.00	28.60	29.40	29.10	30.70
최대전류(Impp)	A	4.55	4.54	4.69	4.61	4.61	4.50	4.72
곡선율(FF)	%	72.53	72.36	73.28	73.43	74.10	74.64	79.23
별효율(CEff)	%	14.30	14.00	14.70	14.20	14.70	14.10	
모듈효율(MEff)	%	12.40	12.20	12.80	12.40	12.70	12.30	
Pmax Drop(%)	%		1.6		2.9		3.5	

표 1은 국내 특정 사이트에서 18개월 사용된 태양전지 모듈의 발전성능 변화를 나타낸 것으로, 대상 시료는 설치 전에 발전성능시험을 수행한 후 설치되었기 때문에 충분한 성능 데이터가 확보되어 있었으므로, 정확한 발전성능의 변화를 관찰할 수 있다. 아래 표에서 보는 바와 같이 3개의 시료 중 1개의 시료는 18개월 사용 후 약 1.6%의 발전성능이 저하되었으며, 또 다른 하나의 시료는 2.9%, 또 다른 하나의 시료는 3.5%의 출력 감소 현상을 보여주고 있다.

표 2. 해외 태양전지 모듈의 노화 사례 분석 결과
 Table 2. Results of aging cases of overseas PV modules

노화 현상	발생비율 (%)
부식 현상	45.3
셀 또는 연결 부위 문제	40.7
출력선 문제	3.9
단자박스 문제	3.6
EVA Sheet 박리	3.4
전선, 다이오드, 터미널 단자 등의 과열 분해	1.5
기계적, 물리적 파손	1.4
바이패스 다이오드 결함	0.2
합계	100

표 2는 해외 태양전지 모듈의 노화 분석 연구를 통해 얻은 결과로 부식 현상의 발생비율이 45.3%를 차지하고 있으며, 셀 또는 연결부 위의 파손 또는 단선 등의 문제

가 40.7%로 2개의 항목에서 86%를 차지하고 있다. 이러한 결과로 볼 때 2개의 노화 현상은 태양전지 모듈 제조 공정에서의 문제점으로 인해 발생할 수 있는 현상으로서, 태양전지 모듈의 수명을 연장할 수 있는 제조기술 개발이 필수적으로 필요하다. 태양광발전시스템 운영 측면에서 노화된 태양전지 모듈을 어떻게 판단하고, 얼마나 빠르게 제거 및 교체할 수 있는지가 시스템의 발전효율을 향상 시키는 데 있어 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

그림 4는 현재 국내외에서 생산되고 있는 태양전지 모듈의 동작에 따른 I-V 곡선으로 1) 태양전지 모듈이 정상 동작하고 있을 때의 I-V 곡선을 보여주고 있으며, 일부 태양전지 Cell이 Crack 또는 음영 등에 의하여 햇빛의 전달이 정상적으로 이루어지지 않을 경우 2) 바이패스 다이오드 (bypass diode)가 있는 경우와 3) 바이패스 다이오드가 없는 경우의 I-V 곡선을 보여주고 있다.

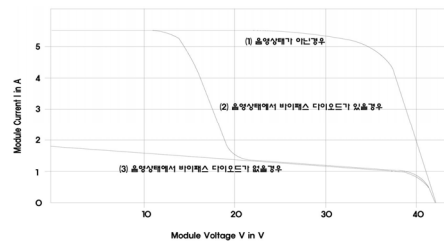


그림 4. 음영에 따른 태양전지 모듈 I-V 곡선
 Fig. 4. PV module I-V curve according to shading

1)의 경우에는 전력 손실이 없고, 2)의 경우에는 전력 손실이 절반으로 감소하지만, 3)의 경우에는 전혀 전력을 생산하지 못하고 있기에 3)의 경우와 같이 바이패스 다이오드가 없을 경우 약간의 Crack이나 음영이 발생하면 전력생산을 전혀 할 수 없는 이러한 현상 등을 방지하기 위해 국외 및 국내의 현재 생산되고 있는 태양전지 모듈은 보통 전류를 우회시키는 바이패스 다이오드에 의존하고 있다. 하지만, 바이패스 다이오드를 사용하더라도 태양전지 모듈을 직렬로 9~20장 설치하므로 어느 태양전지 모듈에서 고장 및 문제가 있는지를 알아내는 방법은 아직 개발되어있지 않은 실정이다.

따라서 기존 기술들의 문제점을 해결하는 방법으로 감시할 수 있는 시스템 개발을 통하여 예측하여 고장 여부 및 발전량을 지속적으로 모니터링하고, Crack 및 음영에 의한 태양전지 모듈 파손을 방지하고, 사업주에게 언제 어디서든 태양광발전 설비동작 상황에 대한 서비스를 제공할 수 있는 통합시스템 필요하다.

III. SoC 기반 MiC 기술개발 현황

태양광발전시스템의 효율 향상을 위해서는 스마트 시스템을 제어하는 MiC의 핵심부품인 SoC의 개발이 매우 중요하며 국내외 관련 업체들의 개발내용은 다음과 같다.

- ARM CortexTM-M
 - ARM11 프로세서 이후 새로운 아키텍처로 ARMv7 아키텍처를 개발하였으며, ARMv7 아키텍처는 2008년부터 CortexTM 제품군으로 출시
 - ARM Cortex-M 프로세서 시리즈 제품군을 통해 마이크로컨트롤러 제조사에 라이선스를 통한 다양한 업계 표준 코어를 제공
- STMicroelectronics STM32
 - 저전력 ARM Cortex-M0 임베디드 프로세서에 강화된 기능을 결합한 STM32-F0 제품군 공개
 - 기존의 ARM Cortex-M3 기반 STM32 시리즈에 Cortex-M4 까지 Cortex-M 시리즈 기반 마이크로 컨트롤러 제품군 완성
 - ST, 에넬 그린 파워, 샤프의 합작사인 3Sun은 이탈리아에 유럽 최대의 태양광발전 전지와 모듈을 생산하는 태양전지 공장준공
- Texas Instruments
 - 디지털 신호를 처리하는 DSP(Digital Signal Processor) 칩과 통신 역할을 담당하는 ARM Cortex-M3 기반 칩을 통합한 32비트 듀얼코어 MCU (콘체르토) 제품 출시
 - 듀얼코어 MCU는 주로 증계기 등 산업 통신 분야와 스마트 그리드, 디지털 파워, 전기차, 태양광 인버터 등이 과녁이며 내셔널 세미컨덕터와 협력을 통해 지능형 태양열 마이크로 인버터 솔루션 제공
- Microchip Technology
 - 태양광발전시스템을 위한 마이크로 인버터의 사례 설계를 개발하였으며, 전원회로 및 역률 개선 회로 제어용 DSC (Digital Signal Controller)인 dsPIC33F GS를 사용
 - 공간이 제한적이고 비용에 민감한 디자인을 위해 소형 패키지에 61DMIPS의 성능을 제공하며 핀 수가 적은 32비트 PIC32 마이크로컨트롤러(MCU) 시리즈(PIC32 'MX1', 'MX2')를 출시
- ETRI
 - DSP코어 및 컴파일러, 어셈블러, 온칩 디버거, 소프트웨어 디버거 등을 망라한 안정적인 플랫폼을 개발

하여 국내 산업체에 다수 기술이전

- 국내 산업체와의 자체 제품기획 및 기술협력을 통하여 멀티미디어 SoC인 EMP500E, 음향효과 SoC 인 EMP7000, 터치센서 SoC인 TC400, TC500, 디지털 신호처리 서브시스템 RT100 등의 제품개발

IV. SoC 기반 보급형 MiC 스마트

태양광발전시스템 기술개발^[4,5,6]

본 논문에서는 태양광발전시스템의 효율 향상/전력 손실의 최소화를 위해 발전효율 저하 및 전력 손실의 원인이 되는 음영, 온도, 모듈 불량, 자연재해 등의 환경적 요인과 모듈 간의 정합, MiC의 발전량과 같은 상황적 요인으로부터 각 모듈을 스마트 모니터링 시스템을 통하여 다음과 같은 기술을 연구한다.

- 발전량 예측, 정보 수집 및 판단, 연계 제어함으로써 태양광 에너지의 효율성 향상
- 전력 손실 최소화, 원가 절감을 위한 스마트 마이크로 인버터(MiC) 시스템기술

그림 5는 태양전지 모듈의 음영, 온도, 모듈 불량, 자연재해 등의 환경적 요인과 모듈 간의 정합, MiC의 발전량과 같은 상황적 요인으로부터 각 모듈을 스마트 모니터링 시스템을 통해 발전량 예측, 정보 수집 및 판단, 연계 제어함으로써 태양광 에너지의 효율성 향상을 위한 SoC 기반 MiC 스마트 태양광발전시스템 전체구성도를 보여주고 있다.

본 연구와 관련하여 개발내용은 다음과 같다.

- 전용 H/W 가속기 기반 복합센서 프로세서 SoC 설계 (그림 6)
 - 저전력 동작 지원 및 MiC 고속 제어를 위한 H/W 가속기 기반의 프로세서 SoC 설계
 - 전용 H/W 가속기는 계산엔진 (전력계산 및 보정 기능을 수행)과 제어엔진 (모듈 고장/단독운전 감지, MPPT 제어, 계통 전압 동기화)으로 구성
- 복합센서 프로세서 SoC 구현 및 검증 (그림 7)
 - MiC 제어용 복합센서 processor SoC를 구현하고 검증
 - 시뮬레이션 검증, FPGA/SoC검증, 실장 연계 검증
- 스마트 모니터링 (그림 8)

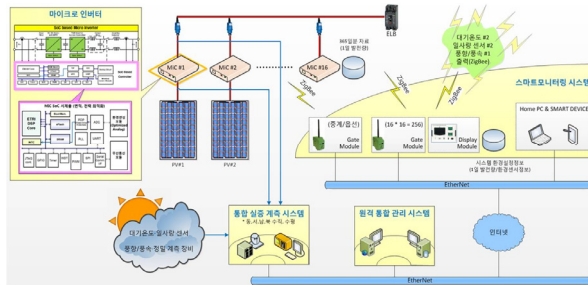


그림 5. SoC 기반 MiC 스마트 태양광발전시스템 전체구성도
 Fig. 5. SoC-based MiC smart photovoltaic system overall configuration

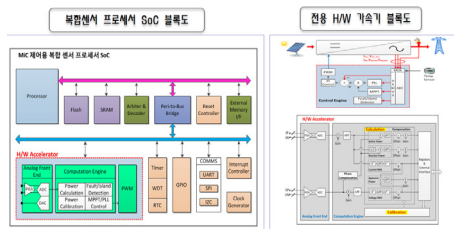


그림 6. 전용 H/W 가속기 기반 복합센서 프로세서 SoC 설계
 Fig. 6. H/W accelerator based multi-sensor processor SoC design



그림 7. 복합센서 프로세서 SoC 구현 및 검증
 Fig. 7. Complex sensor processor SoC implementation and verification

- PV 모듈 단위별 이상감지를 위한 MiC 연계형 RF송수신 embedded system

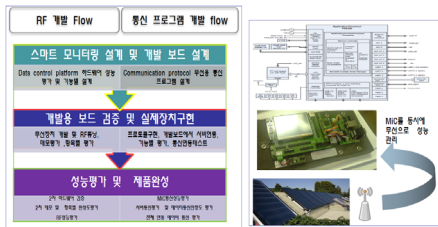


그림 8. 스마트 모니터링
 Fig. 8. Smart monitoring

그림 9는 계통연계를 통한 MiC 운전 중 입력 저전압 상태 시 계통분리를 통한 MiC의 정지상태를 보여주는 결과로 입출력 신호들의 정보에 대한 모니터링을 통해 MiC의 안전상태를 점검하고 있다.

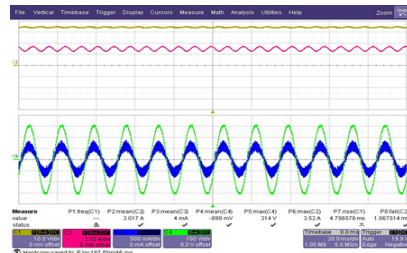


그림 10. MiC 계통연계 운전
 Fig. 10. MiC grid connection operation

(C1: PV voltage [10V/div], C2: PV current [1A/div], C3: 계통전류, C4: 계통전압의 파형을 각각 보여주고 있다.

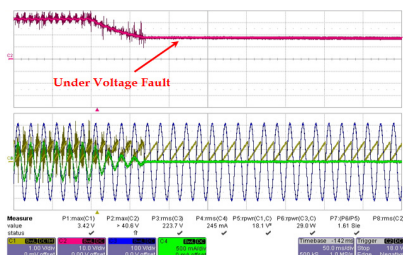


그림 9. 입력 저전압 fault에 의한 계통연계 중지
 Fig. 9. Interruption of grid connection by input low voltage fault

그림 10은 개발된 MiC의 계통연계 운전결과로 190W의 부하 인가 시 C1: MiC 입력전압, C2: MiC 입력전류, C3: 계통전류, C4: 계통전압의 파형을 각각 보여주고 있다. 일사량 가변 시 개발된 MiC의 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 제어 결과 파형으로 일사량을

100%→50% (a), 50%→100% (b)로 각각 가변 시 일사량 변화에 따른 MiC 입력전압 및 전류의 파형을 그림 11에서 보여주고 있다. 계통연계운전 및 일사량 변화에 따라 MiC가 MPPT 제어를 통해 최대전력을 생산하고 있는 결과를 확인할 수 있다.

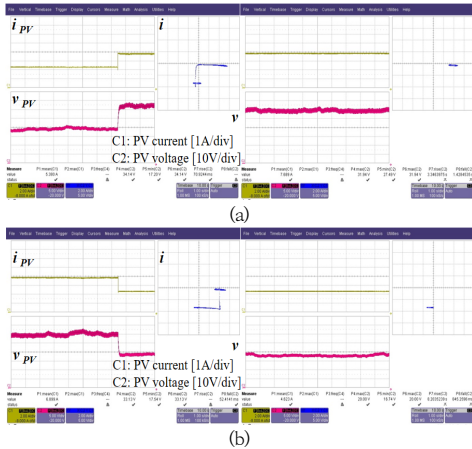


그림 11. 일사량 가변시 MiC의 MPPT 제어
Fig. 11. MPPT control of MiC when solar irradiation is variable

V. 결 론

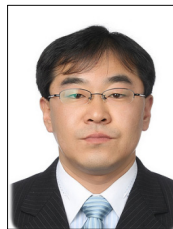
본 연구를 통해 태양전지 모듈의 구성 재료와 공정기술, 모듈 설계기술 및 고효율 MiC 설계기술, 고장 감지 기술 및 무선 전송 기술 등을 총괄적으로 개발하여 최적화된 고효율 저가형 MiC를 장착한 통합시스템 개발하여 통합적인 시스템기술이 확보될 수 있을 것으로 전망한다. 또한, 태양광발전시스템에서 MiC와 무선통신을 사용하는 감시 방식을 통해서 운영상에서 발전 손실을 최소화함으로써 전체적인 시스템 효율을 극대화할 수 있는 기술로써 일반 모듈로 구성된 시스템에 비해 경쟁우위에 설 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Remus Teodorescu, Marco Lisene, and Pedro Rodriguez "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems," John Wiley & Sons. Ltd. 2011. DOI: <http://doi.org/10.1002/9780470667057>
- [2] Detailed Planning Report, "SoC-Based Entry-Level MIC Smart Photovoltaic System Development", Ministry of Knowledge Economy, 2012.
- [3] Y. H Yoon, "A Study on the Technical Standard of Micro-Inverter for Domestic Photovoltaic Power Generation", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC), Vol. 19, No. 2, pp. 175-180, 2019. DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.2.175>
- [4] J. H. So, Y. S. Jung, B. G. Yu, G. J. Yu, and J. Y. Choi, "The Loss Factor Analysis for PV System Optimization," Trans. of KIPE, Vol 11. No. 1. pp. 22-28, 2006.
- [5] Y. H Yoon, "Integrated Management System to Improve Photovoltaic Operation Efficiency", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC), Vol. 19, No. 4, pp. 113~118, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.4.113>
- [6] Y. J. Lee, S. Y. Kim, and S. K. Han, "A Study on the Energy Saving Capacity of Solar Power Generation System using Economic Evaluation", Trans. KIEE. Vol. 67P, No. 1, pp. 21~26, 2018. DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEEP.2018.67.1.021>

저 자 소 개

윤 용 호(정회원)



- 성균관대학교 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 삼성탈레스 종합연구소 전문연구원
- 현재 : 광주대학교 전기전자공학부 교수
- 주관심분야 : 전동기 제어 및 신재생 에너지

※ 이 연구는 2020년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.