

논문 2023-18-02

태양광 패널 재사용을 위한 가변 정전류 기반의 효율 측정장치에 관한 연구

(Research on Variable Constant Current Efficiency Measuring Device for Solar Panel to Reuse)

우 상 진, 김 대 현, 이 재 진, 권 오 민*
(Sang-Jin Woo, Dae-Heon Kim, Jae-Jin Lee, Oh-Min Kwon)

Abstract : This paper relates to the development of a device for measuring the efficiency of a solar panel based on a variable constant current, and proposed a standard for reuse of the solar panel. By applying a variable constant current circuit to a solar panel efficiency measuring device, it was easy to apply a maximum power point tracking (MPPT) algorithm. In addition, a load dispersion method was applied to measure the efficiency of a high-capacity solar panel, and it is possible to solve a problematic thermal runaway during a MOSFET parallel operation by applying the load dispersion method. As a result of the experiment, the solar panel efficiency measuring device was able to accommodate a large solar panel of 350W, which is the maximum measurement goal. In this paper, the validity was confirmed through the 310W solar panel efficiency measurement experiment collected after removal.

Keywords : Solar Panel Reuse, Efficiency Measurement, Variable Constant Current, Thermal Runaway, MPPT, Load Balancing

1. 서 론

태양광 발전설비가 본격적으로 설치되고 운영된 지 20년이 지난 현재 급격하게 늘어나는 폐 패널의 처리방안이 시급하다 [1, 2]. 현재 폐 패널 처리방안으로 폐 패널 재활용에 관한 연구가 많이 진행되고 있으나 폐 패널의 급격한 증가에 따른 혼란과 막대한 처리 비용이 예상된다 [3]. 본 논문에서 철거될 폐 패널 중 재사용이 가능한 태양광 패널을 분류할 수 있는 기준과 장치에 관한 연구를 진행하였다.

전 세계 많은 국가 들은 환경문제가 대두되며 화석연료를 대체하기 위해 신·재생에너지에 대한 많은 관심을 가져왔고, 다양한 신·재생에너지 발전설비들이 설치 및 운영되고 있다. 현재 주로 사용되는 신·재생에너지는 태양광, 풍력, 수력, 태양열 에너지 등이 있다. 그중 태양광 에너지가 가장 보급률이 높고 많은 양의 에너지를 생산한다 [4, 5]. 태양광 발전설비는 공공기관, 상업시설, 아파트, 주택까지 상당히 많은 양이 설치되었다. 태양광 발전설비는 2002년 12월 “제2차 국가에너지 기본계획”정책을 시작으로 본격적으로 보급되었고 점

□ (누적) 원별 비중 · 증감률 및 기여도

구 분	2019		2020		전년대비 증감		
	설비용량	비율%	설비용량	비율%	설비용량	증감률(%)	기여도(%)
총발전설비용량	131,296	100.00	137,444	100.00	6,149	4.69	-
신·재생에너지	20,601	15.69	25,937	18.87	5,336	25.90	100.00
재 생 에 너 지	19,785	15.07	24,979	18.17	5,194	26.25	97.33
신 에 너 지	815	0.62	958	0.70	142	17.46	2.67
태 양 광	12,717	61.7	17,323	66.8	4,606	36.2	86.3
풍 력	1,494	7.3	1,645	6.3	151	10.1	2.8
수 력	1,809	8.8	1,807	7.0	-	-	-
해 양	256	1.2	256	1.0	-	-	-
바 이 오	3,141	15.2	3,526	13.6	385	12.2	7.2
폐 기 물	368	1.8	422	1.6	54	14.6	1.0
연 료 전 지	469	2.3	612	2.4	142	30.4	2.7
I G C C	346	1.7	346	1.3	-	-	-

주 1) 국내 총발전설비용량은 사업자+상용자가+신·재생자가용 합계임
주 2) 혼소발전의 경우 혼소비율을 반영하여 보급용량 산정 : 혼소 설비용량(바이오 2,110MW, 약 59.9%), (폐기물 84MW, 약 17.1%)

그림 1. 신·재생에너지 (누적) 원별 비중·증감률 및 기여도
Fig. 1. new-renewable energy (accumulation) rate and share

점 보급률을 높여갔다. 한국에너지공단에서 2021년 공표한 2020년도 신·재생에너지 설비용량은 25,937MW로 총 발전설비의 18.87%를 차지한다. 그중 절반이 넘는 66.8%의 신·재생에너지가 태양광 발전설비이다. 그림 1 통계자료를 바탕으로 앞으로도 많은 수의 태양광 발전설비가 설치될 것으로 예상할 수 있다. 또한, 국내에 본격적으로 태양광 발전설비 보급사업이 시작된 지 20년이 되었다. 요즘 국내 태양광 패널생산업체에서 생산하는 태양광 패널의 기대수명은 약 30년이지만 2000년대 초 전국적으로 설치된 태양광 패널의 기대수명은 25년가량이다 [6-8]. 앞으로 수많은 폐 패널이 쏟아져 나올 수밖에 없는 이유이다. 많은 양의 태양광 발전설비가 보

*Corresponding Author (madwind@chungbuk.ac.kr)
Received: Oct. 25, 2022, Revised: Nov. 22, 2022, Accepted: Nov. 29, 2022.
S. J. Woo: Chungbuk University (M.S. Student)
D. H. Kim: SungChang (Senior Researcher)
J. J. Lee: SungChang (CEO)
O. M. Kwon: Chungbuk University (Prof.)
* 본 연구는 2023년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임 (No. 20213030160110). 또한 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술평가원의 지역지능화혁신 인재양성 (GrandICT연구센터)사업의 결과로 수행되었으며 (IITP-2023-2020-0-01462), 2020년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2020R1A6A1A12047945).

급된 만큼, 이제는 보급뿐만 아니라 태양광 발전설비 재활용, 재사용에도 관심을 가지고 준비해야 한다. 실제로 국제에너지기구 및 국제재생에너지기구 (IEA - IRENA)의 보고서에 따르면, 한국의 폐 패널 누적 발생량이 2030년 2.5 ~ 15만 톤, 2050년에는 1.5 ~ 2.3백만 톤으로 급격히 증가할 전망이라고 한다 [8]. 중도 철거되는 태양광 발전설비도 그 수가 많다. 철거 후 수거된 태양광 패널은 대부분 외관상 문제가 없다. 철거 현장에서 파손되어 수거되는 제품의 비율이 높지 않다는 것이다. 즉 철거되어 수거되는 수많은 태양광 패널 중에는 재사용이 가능한 태양광 패널이 다수 존재할 수 있다. 그러나 철거 후 수거된 태양광 패널은 대부분 폐 패널로 분류되고 폐 패널에서 유용한 구성 요소들을 분류한 후 재활용될 예정이다 [2, 8]. 본 논문에서 주장하는 바는 철거될 태양광 패널 중 재사용이 불가한 폐 패널은 재활용되고 재사용이 가능한 제품은 분류하여 재사용되어야 한다는 것이다. 태양광 패널을 재사용하기 위해서는 외관상 문제없는 태양광 패널 중 전기적 문제가 있거나 노후되어 발전효율이 떨어지는 제품이 분류될 수 있어야 하고, 발전효율이 좋은 태양광 패널은 재사용하여 태양광 패널 폐기에 필요한 비용을 줄이고 저렴한 가격으로 재사용될 수 있도록 해야 한다.

현재 판매가 이루어지고 있는 태양광 패널의 상당수는 400~580W급이다. 그러나 태양광 패널 효율 측정장치의 최대 측정 목표는 350W급 태양광 패널의 효율 측정이다. 본 장치의 최대 측정 목표 설정의 이유는 태양광 패널 효율 측정장치가 철거될 태양광 패널의 효율 측정을 목적으로 제작되었기 때문이다. 2000년대 초 설치된 태양광 패널의 용량은 대부분 200W이고 기대수명은 25년 이내이다 [6-8]. 태양광 패널 효율 측정장치는 2000년대 초반부터 설치되어 2022년 현재 철거 시점이 되어가는 태양광 패널의 재사용 가능 여부를 판단할 수 있다. 또한, 기대수명이 많이 남았으나 여러 가지 이유로 중도 철거되는 태양광 패널도 수용하기 위해 최대 측정 목표는 350W로 설계하였다. 태양광 패널 효율 측정장치를 활용하여 태양광 패널의 고장 여부를 철거 현장에서 즉각적으로 확인하고 최대 발전량 효율을 측정하였다. 측정된 효율을 기반으로 다른 발전단지에서 재사용할 수 있는 태양광 패널을 손쉽게 분류할 수 있는 태양광 패널 효율 측정장치에 관한 연구를 진행하였다. 태양광 패널의 효율을 측정하기 위해 10W급 비교군 소형 태양광 패널 (Reference) 모듈과 단기 사용 후 철거된 310W급 측정군 태양광 패널 (Object) 모듈을 동시에 효율을 측정하였고, 비교군 소형 태양광 패널 모듈은 10W의 용량 100%의 발전을 했다. 310W급의 측정군 태양광 패널 모듈은 비교군 소형 태양광 패널 모듈과의 발전량 추이로 80% 이상의 발전량을 출력한다면 재사용이 가능한 태양광 패널로 판단할 수 있다고 가정하였고, 효율 측정 시 측정군 태양광 패널 모듈의 최대 발전량이 80%를 넘는 결과가 나왔다. 본 논문에서 개발한 태양광 패널 효율 측정장치는 기존 효율 측정장치와는 다르게 철거 현장에서 바로 효율을 측정하고 분류하여 작업의 효율을 높이기 위한 간이장치이다. 철거 현장에서 폐 패널을 분류한다면 불필요한 운송, 처리 비용 등을 줄일 수 있다. 또한, Ref 모듈과의 발전량 추이를 비

교하여 효율을 측정하기 때문에 햇볕이 충분하지 않은 현장 상황에서도 태양광 패널의 효율을 측정할 수 있다.

II. 국내의 동향

1. 국내 정책 동향

국내의 경우 생산-소비-관리-재생으로 이루어진 순환경제 정책을 추진하고 있으며 점차 순환 이용률 향상을 목표로 하고 있다. 태양광 폐 패널 등 신규 발생 폐기물 중 재사용, 재활용 필요성이 높은 제품을 수거 및 보관하는 ‘미래폐자원 거점수거 센터’도 구축 예정이다 [9]. 또한, 충북 진천군에 태양광 재활용 센터를 구축하며 생산부터 폐기까지 모든 과정을 관리하는 태양광 선순환 체계 구축을 위해 노력하고 있다.

2. 해외 정책 동향

유럽의 경우 2015년 순환경제 이행을 위한 순환경제패키지 (Circular Economy Package) 정책제안을 발표하였으며, 그 외에도 환경 행동 프로그램 (Environmental Action Program), 폐 전기·전자제품 처리지침 (WEEE : Waste Electrical and Electronic Equipment) 등의 환경규제를 구축하였다. EU 폐 전기·전자제품 처리지침 (WEEE)은 폐 전기·전자제품의 재활용 의무 대상에 태양광 폐 패널을 포함시켜 관리체계를 마련하였다. EU 내 시판되는 폐 전기·전자제품의 매립, 소각을 방지하기 위해 전기, 전자제품의 회수 (recovery), 재사용 (reuse), 재활용 (recycle) 비율을 지정하고 폐 패널 수거 및 폐기 시 드는 비용은 모두 생산자 부담 원칙에 따르도록 하였다 [9].

미국의 경우 태양광 폐 패널 회수 및 재활용 관련된 국가 차원의 규정은 없으나 주 정부와 산업체 중심으로 관련 정책을 수립하고 있다. 워싱턴은 2023년부터 생산자책임재활용제도 (EPR : Extended Producer Responsibility)를 시행하여 생산자에게 재활용 부과금을 부과할 예정이다. 캘리포니아의 경우 폐 패널의 수집, 재사용, 재활용 등을 관리하기 위한 범용 유해 폐기물 관련 규정이 2021년 통과되었다 [10].

III. 태양광 패널 효율 측정장치

1. 태양광 패널 효율 측정장치 구성

태양광 패널 효율 측정장치는 측정군 태양광 패널 모듈의 효율을 측정하여 재사용 가능 여부를 판별하는 장치이다. 본 장치는 측정군 태양광 패널 모듈의 효율을 측정하기 위해 비교군 소형 태양광 패널 모듈과의 최대 발전량 추이를 비교한다. 비교군 태양광 패널 모듈과 측정군 태양광 패널 모듈의 최대 발전량 추이를 비교하기 위해 본 장치는 동시에 2개의 태양광 패널의 최대 발전량 측정이 가능하도록 설계되었다. 본 논문에서 비교군 소형 태양광 패널 모듈과 대형 측정군 태양광 패널 모듈을 같은 태양광 환경에 노출하여 각각 태양광 패널의 최대 발전량을 측정할 수 있고, 태양광 패널 효율 측정장치는 각각 패널의 최대 발전량 추이 비율을 측정하여



그림 2. 태양광 패널 효율 측정장치 구성도
Fig. 2. A PV efficiency measuring device block diagram

측정된 태양광 패널 모듈의 효율을 측정할 수 있다. 그림 2는 태양광 패널 효율 측정장치의 구성도이다. 태양광 패널 효율 측정장치는 태양광 패널 출력에서 전압과 전류를 측정한다. 기본적으로 태양광 패널의 출력전압과 전류를 측정하여 1차 태양광 패널의 고장 여부를 판별할 수 있다. 2차로 최대 전력점 추종 알고리즘 (MPPT : Maximum Power Point Tracking)을 이용하여 품질을 측정한다. 가변 정전류 회로를 이용하여 태양광 패널의 출력 전류를 점차적으로 높이면, 태양광 패널은 정격전압을 유지하다 하강하는 (MPPT 곡선) 현상이 나타난다. 태양광 패널의 출력 전류가 상승하고 출력전압이 하강하는 동안 태양광 패널이 출력하는 전압과 전류를 계속하여 측정하고, 전력공식 $P = V \cdot I$ 을 적용하여 연속적인 전력 (W)을 구할 수 있다. 연속적으로 계산된 전력 (W) 중 최대치는 STM 32 컨트롤러의 내부 메모리에 저장된다. 저장된 최대치는 효율 측정 시 사용된다. STM 32는 ST사 (STMicroelectronics)의 32bit 고성능 마이크로 컨트롤러 유닛 (MCU) 제품으로 ARM 코어에 기반하고 있다. STM 32는 GPIO (General Purpose Input Output), ADC (Analog to Digital Converter), DAC (Digital to Analog Converter), PWM (Pulse Width Modulation) 등 다양한 IO를 지원한다. 본 논문에서는 STM 32 M시리즈 제품을 사용하였다.

태양광 패널의 최대 발전량을 측정하기 위해서는 태양광 패널의 출력 특성에 대해 이해해야 하고, 최대 전력점 추종 알고리즘 MPPT를 적용해야 한다. 최대 전력점 추종 알고리즘인 MPPT는 태양광 패널의 품질을 측정하는 가장 합리적이고 검증된 방식이다 [11-14].

태양광 패널은 p-n 접합으로 이루어지며 빛이 입사될 때 태양에너지를 전기에너지로 변환시키는 반도체 소자이다. 즉, p-n 접합에 빛에 의하여 전자-정공이 발생하며 전자와 정공의 이동에 의해 열평형 상태에 비해 캐리어 농도가 상승하여 p형 반도체와 n형 반도체 사이의 농도 차이에 따라 기전력이 발생하는 효과이다. 그림 3은 태양광 패널의 등가회로이다. 이상적인 등가회로에서 부하에 흐르는 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_{ph} - I_r \left[e^{q(V + IR_s) / \eta K_B T} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

(1)에서 태양광 패널의 출력 특성을 구할 수 있다. 여기서

V 는 태양전지의 출력전압, I 는 태양전지의 출력 전류, I_{ph} 는 태양전지의 광전류, I_r 는 태양전지의 역 포화전류, q 는 전하량, η 는 접합 패널의 품질인수, K_B 는 볼츠만 상수

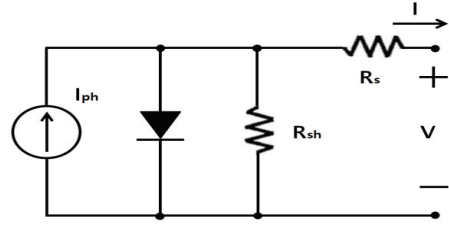


그림 3. 태양광 패널의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of PV

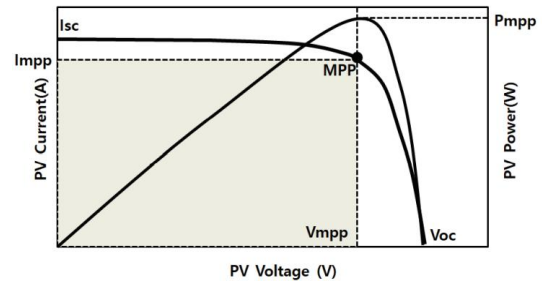


그림 4. 태양광 패널의 출력특성
Fig. 4. Output characteristics of PV

$[J/K]$, T 는 온도 [$^{\circ}K$], R_s 는 태양전지의 내부 직렬저항, R_{sh} 는 태양전지의 내부 병렬저항이다. 그림 4는 태양광 패널의 출력 특성을 나타냈다.

최대 전력점 추종 MPPT에는 다양한 알고리즘들이 적용되고 있다. InC 알고리즘 [11]은 태양광 패널의 P-V 출력 곡선의 기울기를 이용하여 MPP를 찾는 방식이다. InC는 MPP에서 V-P 특성곡선의 기울기가 0이라는 것을 이용하여 기울기의 크기와 부호에 따라 MPP를 찾는 방식이다. P&O 알고리즘 [11]은 전력의 증감률에 의해서 작동하는 방식으로 전압이 한 방향으로 이동하고 그에 따라 전력이 증가하면 같은 방향으로 동작 점을 이동시키고, 전력이 감소하면 반대 방향으로 동작점을 이동시킨다. P&O 알고리즘은 이전의 출력 전력과 함께 현재의 출력 전력을 비교하여 MPP를 연속적으로 추적하며 찾는다. 본 논문에서 태양광 패널 효율 측정장치는 P&O 알고리즘과 유사하게 태양전지의 전류를 주기적으로 증가, 감소시킴으로써 최대 전력점 추종을 한다. 본 장치는 태양광 패널의 출력전압, 전류가 MPPT 곡선을 그리는 동안 모든 전압, 전류값을 저장하고, 전력공식을 적용하여 전력 (W)을 계산하면 최대 전력점을 낼 수 있는 전압, 전류값 지점을 찾을 수 있다. 그림 4에서 최대치인 V_{OC} , I_{SC} 가 아닌 V_{MPP} , I_{MPP} 에서 최대 전력점이 형성된 것을 알 수 있다.

2. 정전류 회로설계

정전류 CC (Constant Current) 모드는 연결된 부하와 관계없이 연속적으로 일정한 전류를 흘려준다. 전기 제품들은 정전압 CV (Constant Voltage) 모드를 많이 사용한다. 정전압 CV모드는 부하와 관계없이 일정한 전압을 유지하는 특성을 가지기 때문에, 많은 전기 제품들은 정전압 방식을 채

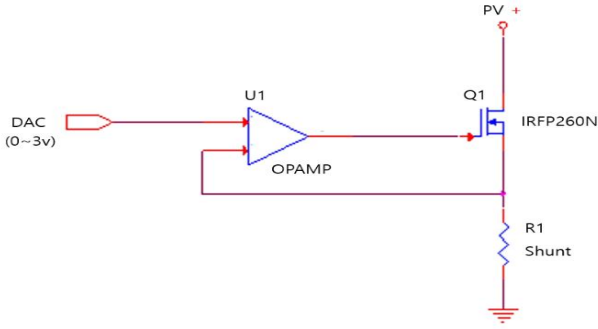


그림 5. 정전류 Reference 회로도
Fig. 5. Constant current reference circuit

택하고 있다. 그러나 태양광 패널의 출력은 MPPT 곡선을 그리기 때문에, 본 실험에서는 가변 정전류 방식이 더 적합하다. 태양광 패널은 충분한 태양광 에너지를 받으면 태양광 패널의 정격전압을 출력하고, 태양광 패널에 연결된 부하가 없다면 작은 양의 전류를 출력한다. 태양광 패널의 전기적 특성 때문에 최대전류를 출력시키기 위해서는 가변할 수 있는 충분한 부하가 있어야 한다. 본 논문에서 비교적 쉽고 간단한 가변 정전류 회로를 설계하였고 태양광 패널의 최대 발전량을 확인하였다.

그림 5는 본 논문에서 사용된 정전류 Reference 회로도이다. STM 32 컨트롤러의 DAC (Digital Analog Converter) 기능으로 연산 증폭기 (Operational amplifier)의 3번 Pin ‘+’ 단자에 가변할 수 있는 전압 (0~3V)을 입력하였고, 연산 증폭기의 출력은 N 타입 MOSFET의 ‘Gate’ 단자에 연결하였다. 피드백 회로 2번 Pin ‘-’ 단자에는 N 타입 MOSFET의 ‘Source’ 단자를 연결하였다. R은 션트저항 (전류측정 저항)으로 작은 값의 저항을 사용하였다. 정전류 Reference 회로의 기본구조는 DAC로 연산 증폭기의 ‘+’ 단자에 점차적으로 전압을 높이면 N 타입 MOSFET가 ‘ON’ 상태가 되고 N 타입 MOSFET의 ‘Drain’ 단자에 연결된 태양광 패널의 출력 전류를 높이는 방식이다. 본 논문에서 STM 32 컨트롤러의 DAC 기능으로 전압을 가변하는 간단한 회로를 구성하였고, 태양광 패널에서 사용자가 원하는 전류의 출력이 이루어지게 설계하였다.

(2)는 R (션트저항)에 걸리는 전력 값 계산식의 예시이다.

$$P = V \times I = \frac{V^2}{R} = \frac{1^2[A]}{0.1[\Omega]} = 10[W]. \quad (2)$$

R (션트저항)에 걸리는 전력을 계산하면, 10A라는 대전류가 R (션트저항)에 흐르고 비교적 작은 전압인 1V가 걸리므로 션트저항 (R)은 10W급으로 사용될 수 있다.

표 1은 본 실험에서 사용한 N 타입 MOSFET IRFP 260N 1개의 단독 부하 실험데이터이다. MOSFET는 방열판에 고정 후 DC 쿨러로 충분한 방열을 하였다. 그러나 표1의 부하 실험 데이터를 보면 200W의 부하에서 MOSFET에는 90℃ 이상의 발열이 발생하였고, 결국 MOSFET는 열 손상이 발생하였다.

표 1. N 타입 MOSFET IRFP 260N 부하실험 데이터
Table 1. Load test data of N ch MOSFET IRFP 260N

Volt	Current	Watt	Temp	Result
10V	10A	100W	51℃	○
14V	10A	140W	57℃	○
18V	10A	180W	72℃	○
20V	10A	200W	90℃ ↑	×

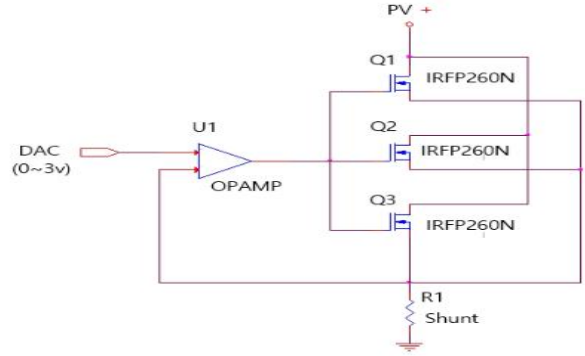


그림 6. 병렬운전 정전류 회로도 1차
Fig. 6. A parallel operation constant current circuit primary

3. 부하분산

정전류 CC 모드는 MOSFET에 연속적으로 많은 전류가 흐르기 때문에 충분한 방열을 해야 한다. 본 논문에서 300W 용량의 IRFP 260N MOSFET를 사용하였고 DC 쿨러로 방열을 하였지만 200W에서 발열 문제로 MOSFET 손상이 발생하였다. 그러나 본 논문의 최대 측정 목표는 350W급 태양광 패널의 효율 측정이기 때문에 발열 문제를 해결해야 했고, 그 해결책으로 부하를 분산하는 기법을 적용하였다. 태양광 효율 측정장치에는 총 3개의 MOSFET의 병렬운전 기법이 적용되었다.

그림 6의 회로에서 3개의 MOSFET 병렬회로를 구성하였지만 열 폭주 현상 (Thermal Runaway)으로 부하분산에 성공하지 못했다. MOSFET 병렬운전 시 MOSFET의 개수와 용량은 비례하지 않는다. 1개의 MOSFET가 200W의 용량을 보였지만, 2개의 MOSFET는 400W의 용량에 도달하지 못했다. 그 이유는 MOSFET의 특성 때문이다. 동일한 MOSFET라도 제조공정의 오차 때문에 MOSFET는 내부저항의 차이가 생기고, MOSFET 병렬운전 시 내부저항이 낮은 MOSFET는 더 많은 발열이 발생한다. 다수의 MOSFET 병렬운전 시 낮은 부하에서는 MOSFET에 비슷한 발열이 발생한다. 부하가 분산되기 때문이다. MOSFET에 흐르는 전류를 점차적으로 높이면, 내부저항이 낮은 MOSFET의 온도가 다른 MOSFET에 비해 조금 더 올라가는 현상이 발생한다. 그 이유는 열이 발생한 MOSFET의 V_{gs} 전압이 더 많이 낮아지기 때문이다. V_{gs} 전압이 낮아진 MOSFET는 다른 MOSFET보다 더 많은 전류가 흐르게 되고 MOSFET가 손상되는 현상이 발생한다. 본 실험과 같이 MOSFET가 손상되는 현상을 열 폭주 현상이라고 한다.

표 2. IRFP 260N 3 병렬 부하실험 데이터 1차
Table 2. The 3 parallel load test data for IRFP 260N primary

Volt	Current	Watt	Temp	Result
10V	10A	100W	48°C	○
14V	10A	140W	53°C	○
18V	10A	180W	70°C	○
20V	10A	200W	90°C ↑	×

표 3. IRFP 260N 데이터 시트 - International Rectifier
Table 3. IRFP 260N Data sheet - International Rectifier [15]

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
A	$I_D @ T_C = 25^\circ C$ Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	50	A
	$I_D @ T_C = 100^\circ C$ Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	35	
	I_{DM} Pulsed Drain Current ①	200	
W	$P_D @ T_C = 25^\circ C$ Power Dissipation	300	W
$W^\circ C$	Linear Derating Factor	2.0	$W^\circ C$
V	V_{GS} Gate-to-Source Voltage	± 20	V
mJ	E_{AS} Single Pulse Avalanche Energy ②	560	mJ
A	I_{AR} Avalanche Current ③	50	A
mJ	E_{AR} Repetitive Avalanche Energy ④	30	mJ
V/ns	dv/dt Peak Diode Recovery dv/dt ⑤	10	V/ns
°C	T_J Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1N-m)	

그림 6은 3개의 MOSFET를 병렬 연결한 Reference 회로 도이다. 3개의 MOSFET의 'Gate' 단에는 같은 전압이 걸리고 3개의 MOSFET는 병렬운전을 시작했다. 점차적으로 회로에 흐르는 전류가 높아짐으로써 전압이 낮아진 V_{gs} 1개의 MOSFET는 열 폭주 현상이 발생하였고, 나머지 2개의 MOSFET에는 점점 흐르는 전류가 줄어들었다. 그 결과 다수의 MOSFET는 병렬운전이 아닌 1개의 MOSFET만 단독 운전하는 현상이 발생하였고 단독 운전하던 MOSFET는 손상이 발생하였다.

표 2는 그림 6의 회로 3개의 MOSFET를 병렬 운전할 때의 실험데이터이다. 1개의 MOSFET를 사용할 때와 차이점은 저전력에서는 부하가 분산되어 전체적인 MOSFET의 발열이 적었다. 그러나 점차적으로 전류를 높이자 V_{gs} 전압이 낮아진 1개의 MOSFET에서 열 폭주 현상이 발생하였고, 고전력에서 1개의 MOSFET를 사용할 때와 동일한 발열이 발생하여 MOSFET의 손상이 발생하였다. 전체적인 실험데이터를 비교했을 때 1개 MOSFET를 단독 운전한 데이터와 3개의 MOSFET를 병렬 운전한 데이터에서 저전력에서는 발열이 줄어드는 차이가 있었으나, 고전력에서는 큰 차이가 없었다. MOSFET 병렬운전 시 제어기법의 보완이 필요하다.

표 3은 N 타입 MOSFET IRFP 260N의 Data sheet의 일부를 발췌한 내용이다. Data sheet의 Absolute Maximum Ratings의 Power Dissipation 항목에는 300W가 기재되어 있다. 그러나 본 실험에서 사용한 MOSFET는 200W에서 손

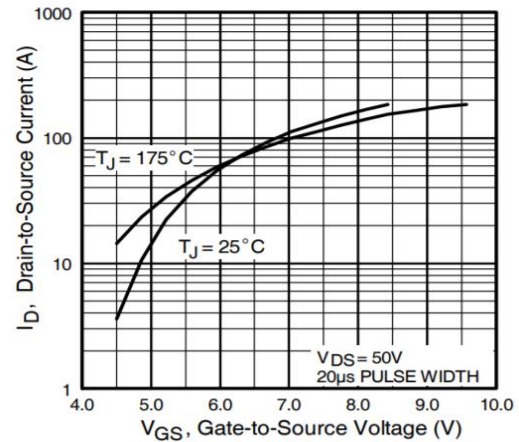


그림 7. IRFP 260N의 V_{gs} 특성 곡선
Fig. 7. V_{gs} characteristics curve of IRFP 260N

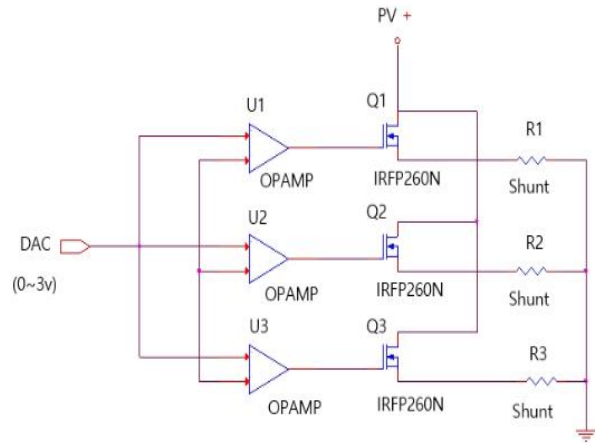


그림 8. 병렬운전 정전류 회로도 최종
Fig. 8. A parallel operation constant current circuit final

상이 발생하였다. 동일한 IRFP 260N MOSFET로 다수의 실험을 진행했으나 MOSFET마다 손상 시점에 약간의 차이가 발생했고 큰 차이는 없었다.

그림 7은 N 타입 MOSFET IRFP 260N의 Data sheet 일부를 발췌한 내용이다. 그림 7은 N 타입 MOSFET IRFP 260N의 V_{gs} 특성 곡선이다. 25°C에서의 특성보다 175°C에서 특성 전류변화폭이 더 가파른 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 그림 6 회로를 보완하여 부하분산을 위해 부하 회로를 각각 분리한 회로도이다. 그림 6의 회로는 MOSFET의 열 폭주 현상 때문에 이상적인 부하분산이 되지 않았다. 그 결과 그림 6의 회로는 300W의 MOSFET 3개를 병렬 운전해도 400W의 전력을 수용할 수 없었다. 본 실험에서는 연산 증폭기와 MOSFET, R (선트저항)을 분리하여 새로운 회로를 구성하였다.

3개의 부하 회로가 전류를 분산제어 함으로써, 기존 회로보다 더 작은 용량의 R (선트저항)을 사용할 수 있었다. 그림 6의 MOSFET만 병렬로 연결했던 회로와 다르게 3개의

표 4. IRFP 260N 3병렬 부하실험 데이터 최종
Table 4. The 3 parallel load test data for IRFP 260N final

Volt	Current	Watt	Temp	Result
16V	10A	160W	48℃	○
20V	10A	200W	52℃	○
24V	10A	240W	59℃	○
28V	10A	280W	62℃	○
30V	10A	300W	65℃	○
32V	10A	320W	68℃	○
34V	10A	340W	70℃	○
36V	10A	360W	74℃	○
38V	10A	380W	78℃	○
40V	10A	400W	80℃	○

부하 회로를 각각 분리해줌으로써, 기존에 문제가 되었던 열 폭주 현상이 완화되었고 각각의 부하 회로에는 이상적인 부하분산이 이루어졌다.

표 4는 3 병렬로 분리되어 각각 연결된 MOSFET의 병렬운전 부하실험 데이터이다. 각각의 MOSFET에는 이상적인 부하분산이 이루어져 400W 부하 테스트 시 130W 정도의 전력이 각각의 부하 회로에 걸렸고, 3개의 MOSFET에는 유사한 열이 발생하였다. 본 논문에서 MOSFET 3 병렬운전 시 부하 회로를 분산시킴으로써, 400W급 태양광 패널까지 문제없이 수용할 수 있는 성과를 얻었다. 본 실험결과를 응용하면 태양광 산업의 발달로 고용량의 태양광 패널이 출시되더라도 태양광 패널 효율 측정장치는 약간의 회로 수정으로 손쉽게 고용량의 태양광 패널을 수용할 수 있다.

태양광 패널 효율 측정장치의 최대 측정 목표는 350W급 태양광 패널이다. 태양광 패널 제조사에 따라 같은 350W급 태양광 패널이라도 각각 태양광 패널이 출력하는 최대전압과 최대전류는 차이가 있다. 즉 350W급 모든 태양광 패널의 효율을 측정하기 위해서는 태양광 패널 효율 측정장치의 측정 가능 범위를 더 높여서 설계해야 한다. 본 논문에서 사용한 태양광 패널 효율 측정장치는 최대전압 40V, 최대전류 10A를 측정할 수 있도록 회로를 설계되었다.

IV. 개발된 태양광 패널 효율 측정장치

1. 개발된 태양광 패널 효율 측정장치

그림 9는 본 논문에서 개발된 태양광 패널 효율 측정장치 사진이다. 태양광 패널 효율 측정장치는 가변 정전류 방식이 적용되어 태양광 패널의 최대 발전량을 측정한다. 태양광 패널 효율 측정장치에 단독 정전류 방식이 적용됨으로써, 비교적 간단한 회로 구성만으로 원하는 태양광 패널의 효율을 측정할 수 있었고, 저전력의 R (선트저항)의 사용은 장비 개발 시 부피, 무게 등에 자유도를 높여주었다. 태양광 효율 측정장치는 총 8kg 이하로 이동이 간편하도록 제작되었다.

본 논문에서 태양광 패널의 재사용을 위해 태양광 패널의 효율을 측정하는 방법을 제안한다. 태양광 패널 효율 측정장치는 비교군 태양광인 소형 태양광 패널 모듈, 효율을 측정



그림 9. 태양광 패널 효율 측정장치
Fig. 9. A solar panel efficiency measuring device

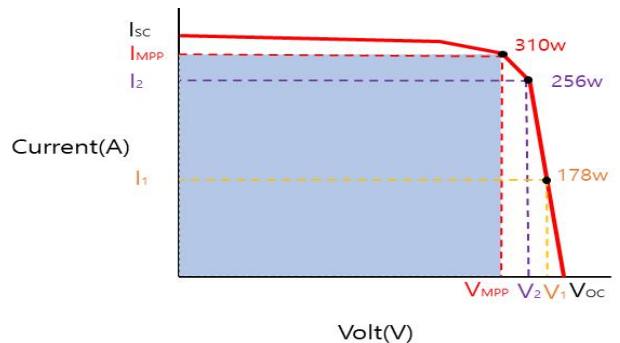


그림 10. 측정군 310W 태양광 패널 최대 전력점 추종 (MPPT) 곡선
Fig. 10. MPPT curve of OBJ 310w PV

하는 태양광 패널로 측정군 태양광 패널 모듈을 사용한다. 효율 측정의 기본개념은 비교군 태양광 패널 모듈과 측정군 소형 태양광 패널 모듈의 발전량 추이 비율을 측정하는 것이다. 태양광 패널 효율 측정장치는 비교군 소형 태양광 패널 모듈의 최대 출력 점을 확인한 후, 측정군 태양광 패널 모듈의 MPPT곡선 최대 출력 점을 찾아낸다. 비교군 소형 태양광 패널 모듈을 사용하는 이유는 실험 현장에서 상대적인 태양광 광량값을 측정하기 위함이다. 태양광 패널 효율 측정장치는 비교군 소형 태양광 패널 모듈을 사용해서 기준을 잡고 발전량 추이 비율을 측정 후, 측정군 태양광 패널 모듈의 효율을 확인할 수 있다. 측정된 효율로 태양광 패널 효율 측정장치는 측정군 태양광 패널 모듈의 재사용 가능 여부를 판단할 수 있다.

2. 최대 전력점 추종 (MPPT) 테스트

그림 10은 310W급 측정군 태양광 패널 모듈의 최대 전력점 추종 곡선이다. 태양광 패널 효율 측정장치는 전류를 가변하여 최대 전력점 추종을 한다. 그림 10 그래프를 보면 전류를 점차적으로 증가시킴에 따라 전압은 V_{OC} 을 기준으로 점점 감소하고, V_{MPP} , I_{MPP} 점에서 최대 전력을 출력한 후 태양광 패널이 출력하는 전압이 급격히 하강하는 것을 알

표 5. 측정군 310W 태양광 패널 MPPT 데이터
Table 5. MPPT data of OBJ 310w PV

Reference	Volt (V)	Reference	Current (A)
V_{OC}	40.22	I_{SC}	9.97
V_1	39.6	I_1	4.5
V_2	38.8	I_2	6.6
V_{MPP}	37.9	I_{MPP}	8.2



그림 11. 태양광 패널 효율 측정1

Fig. 11. A solar panel efficiency measurement 1

수 있다. 태양광 패널 효율 측정장치는 최대 전력점 추종을 통해 측정된 최대 전력점을 이용하여 태양광 패널의 최대 발전량을 측정할 수 있고, 측정된 태양광 패널의 최대 발전량을 토대로 태양광 패널의 효율을 측정할 수 있다. 표 5는 310W급 측정군 태양광 패널 (Object) 모듈의 최대 전력점 추종 데이터이다. 본 실험에서 $V_{MPP} = 37.9V$, $I_{MPP} = 8.2A$ 에서 최대 전력점이 형성된 것을 확인하였다.

그림 11은 태양광 패널 효율 측정 실험 사진이다. 그림 11의 좌측에 거치한 대형 태양광 패널 모듈이 310W급 측정군 태양광 패널 모듈이고 우측에 거치한 소형 태양광 패널 모듈이 10W급 비교군 태양광 패널 모듈이다. 측정군 태양광 패널 모듈과 비교군 소형 태양광 패널 모듈이 동일한 조건으로 측정되어야 하므로, 태양광 패널 효율 측정장치는 동시에 같은 환경에서 각각 패널의 효율을 측정한다.

3. 태양광 패널 효율 측정

태양광 패널 효율 측정장치는 비교군 소형 태양광 패널 모듈과 측정군 태양광 패널 모듈의 최대 발전량 추이를 비교하여 측정군 태양광 패널 모듈의 효율을 측정한다. 본 실험에서 비교군 소형 태양광 패널 모듈과 측정군 태양광 패널 모듈의 일사량 변화에 따른 발전량을 비교하여 효율 측정법을 검증하였다. 그림 12, 그림 13은 비교군 소형 태양광 패널 모듈과 측정군 태양광 패널 모듈의 일사량에 따른 I-V 곡선이다. 일사량에 따라 최대 발전량이 정격전압의 100%에서 80%, 60%로 점점 감소하더라도 감소 추이가 유사한 것을 확인하였다. 표 6은 태양광 패널 효율 측정 시 일사량에 따른 발전량 추이를 비교한 데이터이다.

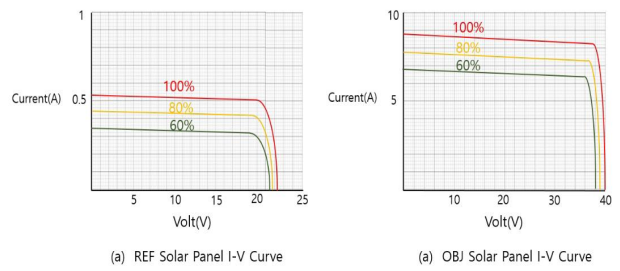


그림 12. 일사량 변화에 따른 I-V 특성 곡선

Fig. 12. I-V characteristic curve for radiation changing



그림 13. 태양광 패널 효율 측정2

Fig. 13. A solar panel efficiency measurement 2

표 6. 태양광 패널 발전량 추이 비교 데이터

Table 6. comparison data PV power generation

REF Watt (W)	Measured value (%)	OBJ Watt (W)	Measured value (%)	Illuminance (Lux)
10	100	310	100	116000
9	90	278	90	112000
8	80	246	80	97000
7	70	214	69	83000
6	60	183	59	60000
5	50	153	50	54000

그림 13은 본 논문에서 개발된 태양광 패널 효율 측정장치로 측정군 태양광 패널 모듈의 효율을 측정된 데이터 사진이다. 비교군 소형 태양광 패널 모듈은 10W로 100%의 성능이 나왔다. 측정군 태양광 패널 모듈의 효율은 80%인 248W 이상이면 양품으로 분류될 수 있다고 가정하였고 실제 측정 시 310W로 100%의 효율이 측정되었다.

현재 전 세계적으로 증가하는 폐 패널에 관한 연구가 진행되고 있다. 그러나 아직 재사용에 관련된 법령이나 규제가 명확히 정해진 국가는 없다. 본 논문에서 해외 선형사례와 국내의 태양광 패널 생산업체의 보증 기간별 기준효율을 참고하여 태양광 패널의 재사용 기준을 가정하였다. 표 7, 표 8은 2019년 기준 국내의 태양광 패널 제조사의 보증 기간별 기준효율을 정리한 표이다. 명확한 기준이 없기 때문에 태양광 패널 제조업체별로 보증해주는 기간과 기준효율의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 그러나 대부분 업체가 80% 이상의 효율을 보증하는 것을 확인하였다. 또한, 선형사례로 2008년

표 7. 해외 태양광 패널 제조사별 Warranty [16]
Table 7. Warranty of overseas solar panel manufacturer

manufacturer	warranty period (year)	performance warranty (%)	nation
SunPower	25	94	USA
Panasonic	25	92	Japan
Canadian Solar	12	84.95	Canada
Jinko Solar	10	83.1	China
Neo Solar Power	10	80.7	Taiwan
Centro Solar	10	80.2	Germany

표 8. 국내 태양광 패널 제조사별 Warranty [16]
Table 8. Warranty of domestic solar panel manufacturer

manufacturer	warranty preiod (year)	performance warranty (%)
LG	25	92.5
Hanwha	12	85
Hyundai	12	80.2
Hansol	10	80

1월 일본의 넥스트 에너지 리소스사는 폐기되는 태양광 패널을 평가 후 1년간 출력을 보증하는 사업을 발표한 적 있다. 넥스트 에너지 앤 리소스사는 1년간 80% 이상의 성능을 출력하지 못하면 대체품으로 교환 또는 환불해 준다는 조건을 붙였다. 국내 기업들도 노후 태양광 패널을 해외로 수출하는 사업을 진행하고 있으나 정확한 기준은 없다. 본 논문에서 개발한 태양광 패널 효율 측정장치는 이러한 상황을 고려하여 80%를 임시기준으로 정하였다.

V. 결론

태양광 패널을 재사용하기 위해서는 기준치 이상의 발전량을 출력해야 한다. 현재 재사용을 위한 태양광 패널의 효율 기준치는 정해지지 않았기 때문에, 본 논문에서는 국내외 태양광 패널 제조업체의 Warranty와 선행사례를 참고하여 80%를 기준으로 가정했다. 비교군 태양광인 소형 태양광 패널 모듈, 효율을 측정하는 태양광 패널을 측정군 태양광 패널 모듈로 지정하였다. 태양광 패널 효율 측정장치는 10W급의 소형 태양광 패널 모듈의 효율을 측정하여 효율이 100%가 나오고, 310W급 측정군 태양광 패널 모듈은 80%인 248W의 출력을 낼 수 있다면 측정군 태양광 패널 모듈은 양품으로 분류될 수 있도록 가정하였다. 본 논문에서 태양광 패널 효율 측정장치는 단기 사용 후 철거된 측정군 태양광 패널 모듈과 소형 태양광 패널 모듈의 최대 발전량 추이를 비교하여 100%의 효율을 낼 수 있다는 것을 확인하였다. 아직 태양광 패널 재사용에 관한 연구가 많이 진행되지 않았기 때문에 본 논문에서 80%를 기준으로 가정했다. 현재 재사용

가능 여부를 판단할 수 있는 기준에 대한 근거에 미흡함이 있으나 향후 풀어갈 과제라고 생각한다. 앞으로 국내외적으로 재사용에 관한 지속적인 연구가 이루어진다면 재사용에 대한 명확한 기준을 제시할 수 있을 것으로 생각한다.

2018년 환경부에서 공개한 자료에는 “2023년 이후 태양광 폐 패널의 발생량이 급증할 것으로 전망 (2023년 약 9,681톤) 되나, 폐 패널의 수거 및 재활용체계는 아직 구축되지 못한 상황”이라며 폐 패널 재활용체계 구축 필요성에 대해 발표하였다. 전문가들은 폐 패널에서 유용물질 (알루미늄 프레임, Si cell 조각, 유리컬렉, CIS 금속분말) 등의 유용물질 회수하여 재활용하는 방법 등을 논의하고 있다. 그러나 태양광 패널이 사용 후 재활용되는 전 과정에 소요되는 단위비용 (원/kg)은 총 1,032~3,555원으로 추산된다. 상업용, 주택용 등 설치장소 등에 따라 예상처리 비용은 다르지만 2023년 이후 급증할 폐 패널의 발생량을 생각한다면 결코 적은 비용이 아닐 수 없다. 현재 발생하는 폐 패널 중 재사용이 가능한 비율이 어느 정도 일지는 알 수 없다. 아직 폐 패널 재사용에 관한 연구가 많이 진행되지 않았기 때문이다. 본 논문에서 주장하는 바는 철거되는 폐 패널을 무조건적인 폐기나 재활용이 아닌 효율 측정을 통해 재사용이 가능한 태양광 패널은 재사용하자는 것이다. 본 논문에서 개발된 태양광 패널 효율 측정장치가 그 첫걸음이 되기를 바라며 앞으로도 태양광 패널 재사용에 관한 지속적인 연구와 개선이 진행된다면 앞으로의 태양광 산업에 큰 기여가 될 것으로 기대된다.

References

- [1] 이상수, “태양광 폐패널의 재활용정책방향,” 한국폐기물자원순환학회 심포지움 2018권 2호, pp. 87-95, 2018 (in Korean).
- [2] 김우일, “태양광발전 폐기물의 적정관리방안,” 한국폐기물자원순환학회 심포지움 2018권 2호, pp. 97-108, 2018 (in Korean).
- [3] Boram Kim, Jinyoung Kang, Sinae Park, Jaemin Jang, Jong Ho Hong, “Study of Unit Cost Estimation for the Appropriate Treatment of End-of-life Photovoltaic (PV) Modules,” Journal of Korean Society for New and Renewable Energy Vol. 15, No. 1 pp. 36-46, 2019 (in Korean).
- [4] 한국에너지공단, “2020년 신·재생에너지 보급통계[2021년 공표] 결과 요약,” 2021 (in Korean).
- [5] 김동환, “태양광 분야의 기술개발 및 산업화 전략,” Journal of Korean Society for New and Renewable Energy Vol. 1 No. 1, pp. 8-14, 2005 (in Korean).
- [6] 산업자원부, “태양광 발전의 개발 및 보급전략,” 2004 (in Korean).
- [7] E. H. Kim, S. W. Kang, J. E. Kim, “The Long-term Operating Evaluation of the Grid Connected Photovoltaic System,” Journal of Korean Society for New and Renewable Energy Vol. 7, No. 2, pp. 28-35, 2011 (in Korean).
- [8] 임송택, “태양광 폐 패널 발생 및 처리 동향,” 코네틱 리포트, 2019 (in Korean).

[9] 김태경, 김가영, “태양광 폐패널 재활용 기술,” KISTEP 기술동향브리프, 2021 (in Korean).

[10] T. L. Curtis, H. Buchanan, G. Heath, L. Smith, S. Shaw, “Solar Photovoltaic Module Recycling: A Survey of U.S. Policies and Initiatives,” No. NREL/TP-6A20-74124. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2021.

[11] J. J. Kim, C. B. Kim, “Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm,” Journal of Advanced Navigation Technology Vol. 24, No. 4, pp. 291-298, 2020 (in Korean).

[12] J. S. Ko, D. H. Chung, “MPPT Control of Photovoltaic using Variable IC Method,” Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation

Engineers Vol. 26, No. 8, pp. 27-34, 2012 (in Korean).

[13] J. S. Ko, D. H. Chung, “MPPT Control of PV System Using Improved PO Method,” The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 12, pp. 1649-1654, 2014 (in Korean).

[14] G. B. Cho, Y. O. Choi, H. L. Baek, “The Realization of MPPT Controller Using Fuzzy Controller for Photovoltaic System,” Journal of the Korean Solar Energy Society Vol. 24, No. 2, pp. 89-96, 2004 (in Korean).

[15] IRFP260N Data sheet - International Rectifier

[16] Energy Sage, <https://news.energysage.com/shopping-solar-panels-pay-attention-to-solar-panels-warranty/>, 2021.

Sang-Jin Woo (우 상 진)



2018 Department of control and robotics from KSNU (B.S.)
 2023 Department of Industrial AI from CBNU (M.S. Student)

Career:

2017~H/W Engineer, SungChang
 Field of Interests: hardware, firmware, new and renewable energy, Deep Learning
 Email: sjwoo@sctele.co.kr

Dae-Heon Kim (김 대 현)



2005 Department of Information Control Engineering from KNUT (B.S.)
 2007 Department of Information Control Engineering from KNUT (M.S.)

Career:

2007~2010 H/W Engineer, Hanyoung Electric
 2010~2013 H/W Engineer, TeeTech
 2013~2016 H/W Engineer, KNUT
 2016~2018 H/W Engineer, TeeTech
 2018~ H/W Engineer, SungChang
 Field of Interests: hardware, firmware, new and renewable energy.
 Email: dhkim@sctele.co.kr

Jae-Jin Lee (이 재 진)



2006 Electronic Engineering from AJOU Univ. (B.S.)
 2014 Electronic Engineering from AJOU Univ. (M.S.)
 2014 Space Survey Information Technology from AJOU Univ. (Ph.D.)

2002~CEO and Research Director at SungChang Co.

Career:

2002~ CEO and Research Director, at SungChang Co.
 2009~2019 Lecturer, at Chungcheong Univ. Department of Electronic Communication
 2019~2020 Lecturer, at Korea Polytechnics Univ. Department of Information and Communication
 Field of Interests: power electronics, electronic control, remote control, software realization, broadband network
 Email: master@sctele.co.kr

Oh-Min Kwon (권 오 민)



1997 Electronic Engineering from Kyungpook Univ. (B.S.)
 1999 Electrical and Electronic Engineering from POSTECH. (M.S.)
 2004 Electrical and Electronic Engineering from POSTECH. (Ph.D.)

2006~Professor at School of Electrical Engineering, Chungbuk National University .

Career:

2004~2005 Senior Engineer, Mechatronics Research Center at Samsung Heavy Industry.
 2006~Professor at School of Electrical Engineering, Chungbuk National University
 Field of Interests: Stability analysis and control design for linear/nonlinear systems with time-delay systems, parameter uncertainty, saturation, disturbance, and so on.
 Email: madwind@chungbuk.ac.kr