

태양광발전소 현장 진단평가 기술: 발전량 시뮬레이션과 다채널 I-V 장치를 통한 고장진단



고석환
한국에너지기술연구원
책임연구원



신우균
한국에너지기술연구원
연구원



신주영
한국에너지기술연구원
학생연구원



최의성
(주)네오에너지커넥터
대표

Abstract

태양광 발전소에 대한 성능을 평가하기 위해서는 IEC 61724-1에 적합한 계측장치를 설치하고 데이터를 수집하여 평가하는 것이 일반적인 방법이다. 본 논문에서는 태양광발전소 현장에서 DC 어레이 성능을 평가하기 위한 방법을 제시하였다. 측정 일사량과 같은 환경정보 값과 태양광 DC 어레이 전압-전류 특성 곡선을 이용해 일사량에 따른 출력모델 식을 도출하였다. 도출된 모델 식은 태양전지 셀의 종류나 버스 바에 따라서 차이가 발생되므로 기존의 태양전지 셀 등가회로 수식을 반영한 시뮬레이션 모델식이 적절히 변경되어야 함을 실험을 통해 검증하였다. 주기적인 진단 평가를 실시하지 않는 국내외 태양광 발전소는 성능저하가 발생한 상태로 운전되는 경우가 다수 일 것이다. 대부분의 관제모니터링을 시스템은 미쓰매칭 손실 평가분석이 불가능하며 운전상태 모니터링 하는 시스템이 대부분이다. 이에 태양광 발전소의 효율적 운영을 위해서는 현장진단 장치를 이용한 주기적 성능진단 평가나 발전소 데이터의 손실평가 분석 기술의 개발이 필요할 것이다.

개 요

2021년 7월 현재 국내 태양광발전시스템의 누적설치량은 RPS 기준 18GW 이상이며, 탄소중립을 위한 재생에너지의 발전비율 확대 정책으로 인해 2050년까지 지속적인 설치량 증가가 예상되고 있다.^[1] 이로 인해 태양광 운영관리 시장은 지속적으로 커지고 있으며 효율적으로 발전소를 관리하기 위한 진단장비와 진단기술이 필요한 실정이다. 태양광 운영관리기술은(Operation & Maintenance) 일반적으로 모듈, 접속함 그리고 인버터 점검, 모듈 표면 클리닝, 잡초제거, 관제 모니터링 기술을 일컫는다.^[2] 태양전지모듈의 고장은 핫스팟, 습윤 누설, 절연성능 파괴, 리본 접합 불량, 유리파손 등 다양한 사례가 발생되고 있다.^[3,4] 접속함의 고장으로는 퓨즈 소손, 접속단자 아크로 인한 화재, 합체 내 수분침투로 인한 화재, 역방지 다이오드의 고장과 열 배출 미비로 인한 고장 등이 있다. 인버터 고장은 배기 팬의 고장, IGBT의 소손, 리액터 및 부품의 손상 등 다양한 고장이 발생되고 있다. 이 중에서 태양광 시스템이 가지고 있는 큰 단점 중에 하나가 미스매칭 손실이 발생하는 모듈의 고장이라고 할 수 있다. 중·대형 태양광 발전소에 적용되는 Central 인버터 형식의 태양광 DC 어레이는 모듈이 직렬 연결된 스트링이 병렬로 연결된 구성을 갖는다. 태양전지모듈이 직렬로 연결되는 스트링에서 출력 전류는 가장 낮은 출력전류를 갖는 모듈에 의해 정해지는 특징이 있는데 이를 직렬 미스매칭 손실이라고 한다. 태양광발전소의 성능을 원활히 유지하기 위해서는 이러한 미스매칭 손실을 즉시 발견하고 원인을 해결하여만 운영손실을 최소화 할 수 있다. 최근에는 이와 같은 운영관리기술이 인공지능 기술과 접목되어 진화되고 있는 중이다. 드론 열화상이나 드론 EL 등의 장치를 이용해 대용량 태양광발전소의 수많은 태양전지모듈의 상태를 빠르고 쉽게 고장 진단할 수 있는 기술이 상용화 되었다. 드론 열화상을 이용한 태양광발전소 진단은 쉽고 빠르게 진단할 수 있다는 장점은 있으나, 태양광발전소 성능저하를 판단하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 태양광 발전소에서

DC 어레이의 고장과 성능저하를 명확히 판단하기 위한 새로운 방법이 요구되고 있다. 태양광모듈(어레이 포함)의 전기적 특성과 더불어 성능을 판단하는 방법이 전압-전류 특성곡선 방법이다. 스트링인버터를 이용해 스트링의 전압-전류 특성곡선을 측정해 발전소를 관리하는 중국의 기업의 경우 발전소 운영효율을 5% 이상 향상시켰고, 고장 요인을 98% 이상 정확히 알아내 발전소를 관리했다는 보고 자료를 제시한 사례도 있다. 본 논문에서는 태양광 운영관리의 기술 동향과 더불어 발전소 성능 상태를 정확히 판별하기 위한 연구개발에 관한 결과와 태양광발전소의 사고를 방지하기 위한 방안에 대한 제언을 하고자 한다.

태양광발전소 운영관리 기술

태양광 발전소는 설치 시부터 유지보수 계획을 수립하여 운영하게 되는데, 국내의 경우 EPC 기업, 하드웨어 제조(모듈 및 인버터 제조사)기업에 의하여 유지보수 활동이 대부분 이뤄지고 있으며, 2020년에 들어서 디지털 모니터링서비스 기술기반에 의한 소프트웨어 기업들이 유지보수 사업을 확장시키고 있는 상황이다.

그림 1은 태양광발전소 유지보수 활동 및 계약이 변화되고 있는 추세를 나타낸다. 과거에는 발전소의 고장을 발견하고 유지보수 활동을 진행했으나, 현재는 발생될 고장을 사전에 감지·예측하는 센서 기반의 다양한 기술이 포함된 유지보수 활동이 진행되고 있다. 이를 통해 태양광발

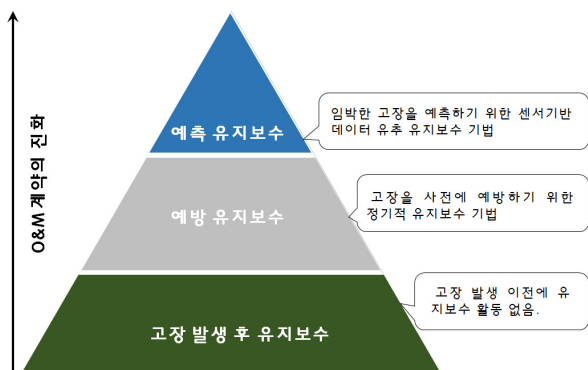


그림 1. 유지보수 서비스의 진화



그림 2. 유지보수 활동의 종류

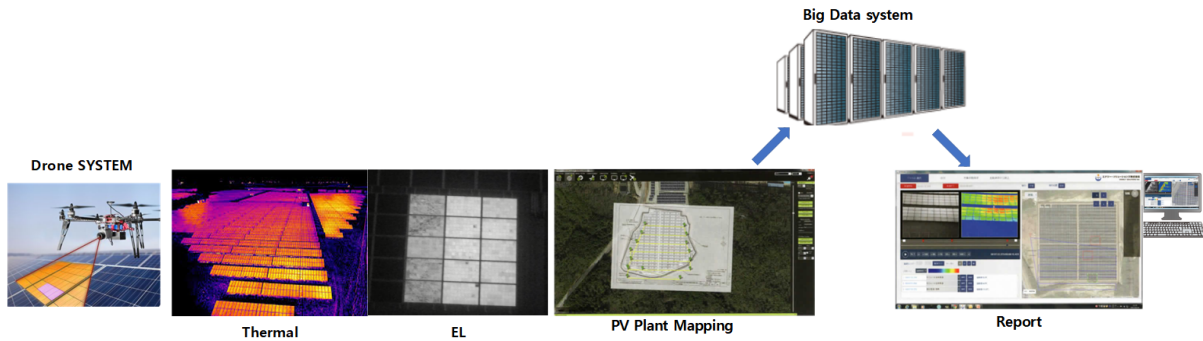


그림 3. 열화상, EL 카메라를 장착한 드론이용 모듈 패널 검사방법

전소 성능을 향상시킬 수 있는 것이다. IEC 표준에서는 태양광발전시스템에 대한 O&M 표준 가이드가 제정이 되고 있지 않은 상태이며, 국내에서도 O&M 시장의 활성화를 위한 유지보수 서비스에 대한 표준 가이드 제정이 필요한 실정이다. 태양광발전설비는 건물형, 수상형, 영농형, 일반형 등 다양한 장소에 설치되고 있으며, 다양한 설치장소에 대한 상세한 설치 및 유지보수 가이드 마련을 통해 유지보수 활동에 문제가 없도록 준비를 해야만 한다.

본 절에서는 태양광발전소 운영 관리를 위한 일반적인 기술과 최근 적용되는 기술 동향에 대하여 소개하고자 한다.

일반적인 태양광발전소 운영관리 서비스

태양광발전소의 일반적인 관리 및 서비스는 그림 2와 같다. 국내의 경우 중대형 태양광 발전소에서 대부분 이러한 유지관리 서비스가 시행되고 있다. 모듈, 접속함, 인버

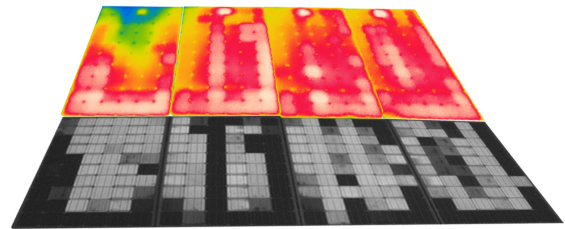


그림 4. 열화상, EL 장치를 이용한 모듈 촬영 영상(PID 발생 모듈)

터 점검은 고장 후 점검을 실시하는 방법이며, 잡초제거나 표면 오염제거는 예방적 유지보수 활동에 속할 수 있다.

ICT 기술이 융합된 태양광발전소 진단 기술

“4차 산업 기술”의 발전에 의해 태양광발전소를 진단하는 기술도 진화되고 있는데, 이중에 대표적인 방법인 드론 열화상과 EL이미지를 적용한 기술이다. 지도의 맵 데이터와 연동해 발전단지의 모듈 고장을 쉽고 빠르게 파악이 가

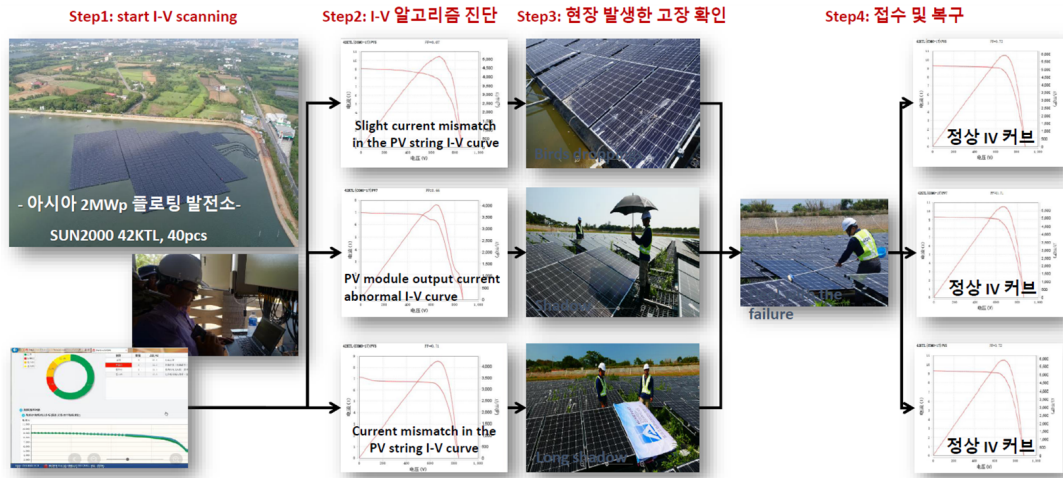


그림 5. 전압-전류 특성곡선을 이용한 시스템 고장진단(O&M 기술)

출처: 중국 화웨이사

능하다. 최근 일본의 기업에서는 모니터링 데이터와 열화 상이미지를 이용해 발전소 성능저하를 판단하는 기술을 개발하고 사업화를 수행 중에 있다. 열화상카메라의 경우 햇빛의 반사로 인해 촬영이 어려울 수 있으며, 모듈의 성능저하를 판단하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

중국의 스트링인버터 제조사인 H社에서는 전압-전류 특성곡선을 이용한 스마트 모니터링시스템을 개발하여 사업화를 진행 중에 있다.^[6] 그림 5는 스트링인버터가 적용된 태양광 발전소에서 각 스트링의 전압-전류 특성곡선을 측정하여 음영, 오염 등을 파악하여 서비스 활동을 수행하는 사례이다. 스트링의 직렬저항과 병렬저항의 변화에 따른 추이를 통해 현재 스트링의 어떠한 고장이 발생되었는지 파악이 가능한 방법이다. 태양광어레이의 고장과 성능을 명확히 할 수 있는 방법은 전압-전류특성곡선을 파악하는 것이라는 것을 본 사례를 통해 확인할 수 있다.

전압-전류 특성곡선을 이용한 발전량 시뮬레이션 방법

일사량과 전압-전류 특성곡선 상관관계 분석

태양광 DC 어레이 발전량을 예측하기 위해서 태양전지

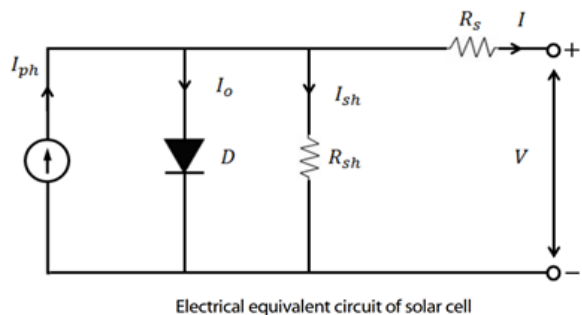


그림 6. 태양전지 셀의 등가회로^[5](Gray, 2011)

등가회로 모델을 이용한 수학적 모델을 통해서 가능하다. 일반적으로 태양전지의 직렬저항과 병렬저항은 일사량에 따라 변하기 되는 비선형적 요소로서, 정확한 태양광 어레이의 발전량을 예측하기 위해서는 이러한 비선형적 요인을 선형화하는 것이 매우 중요하다.

$$I = I_{sc} - I_d - I_{sh} \\ = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

여기서, I 는 출력전류(광전류), I_{sc} 는 단락전류, I_d 는 이상적인 다이오드 전류, I_{sh} 는 병렬저항손실 전류이다.

발전량을 시뮬레이션 툴인 PVsyst의 경우에도 태양전지

모듈의 특성곡선 데이터를 이용해 발전량을 시뮬레이션 한다. 그림 7은 PVsyst 시뮬레이션 툴에서 제공되는 250Wp 60 셀 태양광모듈에 대한 전압-전류 특성곡선이다. PVsyst 툴의 경우 최근 버전에서는 개선이 되었으나, 과거 모델링에서는 일사량 변화에 따른 충전률(Fill Factor)가 동일하게 모델화 되어, 저 일사량에서 발전량에 대한 예측 오차가

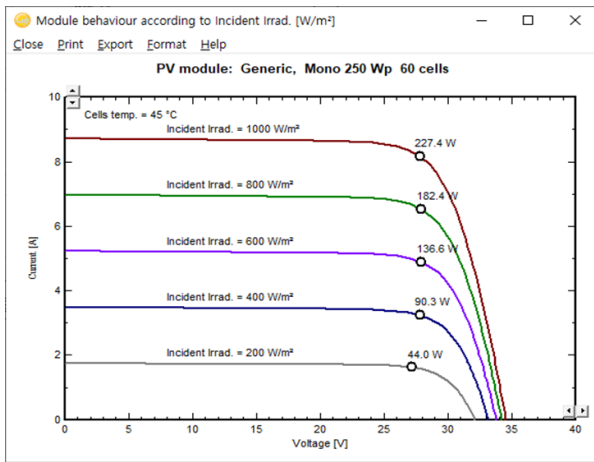


그림 7. PVsyst 툴의 일사량에 따른 태양광모듈 전압-전류특성곡선

크게 발생되었다.

태양광모듈의 일사량에 대한 충전률 특성을 확인코자 PV 시뮬레이터를 이용하여 일사량 변화에 대한 전압-전류 특성곡선의 변화를 측정하였다. 일사량 광량을 변화시키기 위해서 20%, 40%, 60%, 80% 광량 감쇄 매쉬를 이용, 일사량이 200에서 1000W/m² 까지 광량에 따른 전압-전류 특성곡선을 측정하였다.

다양한 실리콘 태양전지 모듈의 측정 사례 중에서 일사량 변화에 따른 컬러 BIPV 모듈 사례 결과를 소개하고자 한다. 그림 9는 컬러 태양전지모듈(24셀)과 측정 장비를 나타낸다. 전압-전류 특성곡선은 광량을 200W/m²에서부터 1000W/m²까지 변화해 가면서 측정을 실시하였다. 측정결과 충전률은 광량이 증가될수록 80.9%에서 78.2%로 감소되는 특성이 있는 것을 확인할 수 있었으며, 다양한 태양전지 셀을 갖는 모듈을 측정한 결과 셀의 버스바 연결 구조와 같은 직병렬 저항 성분 차이에 따라 모듈별로 차이가 발생되었다.

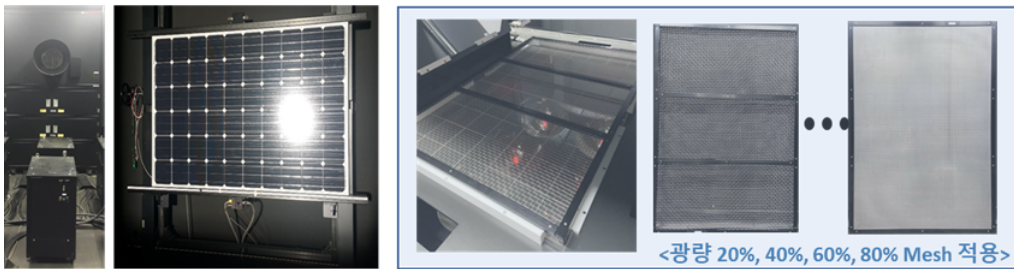


그림 8. PV시뮬레이터를 이용한 광량에 따른 전압-전류 특성 곡선 측정

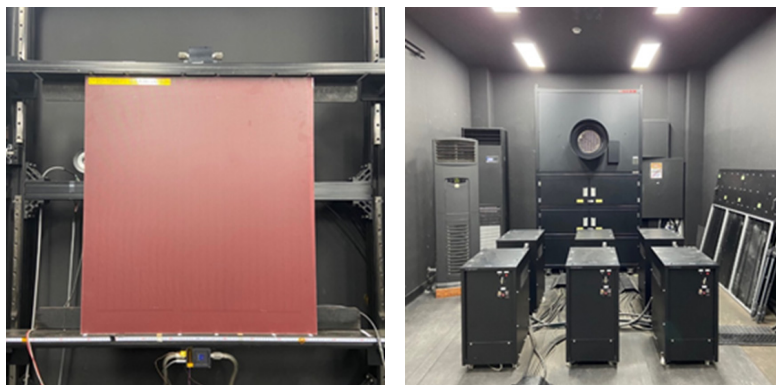


그림 9. 컬러 태양광모듈과 시뮬레이터(장비)

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s + K)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s + K}{R_{sh}} \quad (2)$$

또한, 일사량이 변화에 따른 전압과 전류의 동작지점 상태변화를 선형회귀 방정식을 이용해 정리하면 다음의 식 (3), (4), (5)와 같다. 일사량에 따라 전류 특성 값은 선형적으로 변화되는 것을 확인할 수 있으며, 전압특성방정식의 경우 일사량에 따라서 선형화 변환 시 전압 오차 값이 커질 수 있음을 확인할 수가 있다. 또한, 온도는 다른 전압, 전류 온도계수 값을 적용할 경우 식 (3)~(5)와 같다.

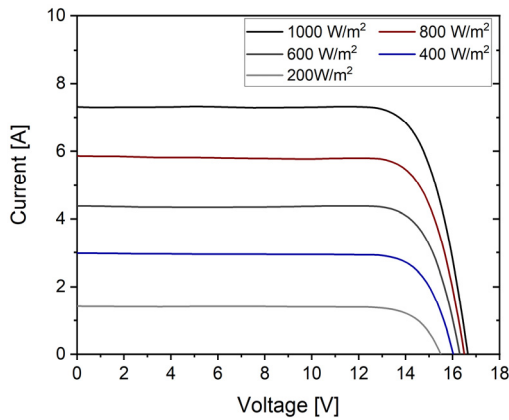
$$V_{mp} = (a_v \cdot \ln(I_r) + b_v) \times (1 - a_{t_v} \cdot (T_m - 25)) \quad (3)$$

$$I_{mp} = (a_i \cdot I_r + b_i) \times (1 - a_{t_i} \cdot (T_m - 25)) \quad (4)$$

$$P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (5)$$

여기서, a_v, b_v, a_i, b_i 는 전압과 전류에 대한 상태변환 계수, I_r 은 측정 일사량, T_m 은 모듈측정온도, a_{t_v}, a_{t_i} 는 모듈 제조사 제공 전압과 전류에 따른 온도계수이다.

측정데이터의 선형화를 통해 최대출력 동작전압과 전류에 대한 시뮬레이션이 가능하고, 셀의 종류와 버스바의 종류에 따라 모델 식을 변경하여 적용할 경우 보다 정확한 전압-전류 특성곡선 예측이 가능할 것이다.



일사량 [W/m ²]	I_{mp} [A]	V_{mp} [V]	P_{max} [W]	FF [%]
200	1,397	13,29	18,6	80,9
400	2,829	13,59	38,5	80,5
600	4,224	13,71	57,9	79,7
800	5,610	13,73	77,1	79,0
1000	7,014	13,74	96,3	78,2

그림 10. 전압-전류 특성곡선 측정 결과

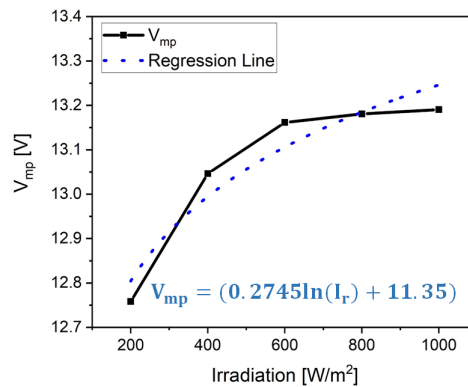
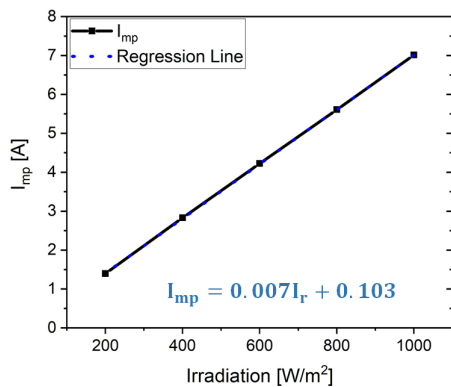


그림 11. 컬러 24셀 모듈의 일사량에 따른 전압, 전류 선형화 모델 변환

태양광발전소 성능진단 사례

본 절에서는 태양광 발전소에서 다채널 전압-전류 측정 장치를 이용하여 태양광 DC 어레이의 성능을 평가하는 방법을 소개하고자 한다. 태양광 발전소는 다수의 태양광모듈이 직렬로 연결된 스트링이 병렬로 연결되어 있으며, 직병렬 DC 어레이 용량이 약 100kW급 내외로 태양광 접속함을 통해 인버터에 연결되는 구조를 갖는다. 이에 따라 100kW급 접속함에서 동시에 다수의 스트링 전압-전류 특성곡선을 측정할 경우 각 스트링별 발전능력과 이상 스트링의 발견이 용이한 장점이 있다. 또한, 일사량과 온도 측정값을 이용한 전압-전류 특성곡선 시뮬레이션을 이용한다면 현재 운전되고 있는 태양광발전소의 성능평가가 가능할 것이고, 곡선의 형상에 따라 고장진단 파악이 가능하다. 시뮬레이션을 위해 태양광발전소에 설치된 태양전지 모듈의 정격데이터와 직병렬 연결 정보가 필요하다. 다채

널 전압-전류특성 곡선 측정 장치는 하나의 전압-전류 특성곡선 측정 장치의 단점인 태양광 미스매칭 손실계산과 더불어 각 스트링의 성능을 상대비교를 위해 개발 된 현장 진단 장치이다. 또한, 전압-전류특성곡선 측정뿐 아니라, 각 스트링의 절연상태 진단이 가능하다. 이를 통해 스트링의 절연성능 저하 정도를 판단할 수 있다. 본 장비는 산업통상부 신재생에너지핵심개발 연구 사업을 통해 개발이 완료되어 현재 사업화 진행 중에 있다. 또한, 본 장비는 단순히 다수의 전압-전류 특성곡선을 측정할 뿐 아니라, 3절에서 언급한 전압-전류 특성곡선 시뮬레이션을 통해 현재 태양광발전 DC 어레이의 성능을 평가할 수 가 있다. 본 장에서는 태양광발전소 현장에서 성능진단 평가를 수행한 사례를 소개하고, 다양한 고장이 발생되었을 경우 전압-전류 특성곡선의 변화에 대해 알아보려 한다.


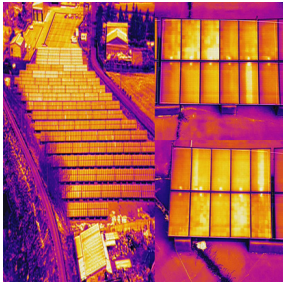
표 1은 사례진단 발전소의 정보를 나타낸다. 전압-전류 특성곡선 뿐 아니라 드론열화상 이미지도 측정하였다. 발



그림 12. 다채널 전압-전류 곡선 측정 장치 및 접속함

자료제공: (주)네오에너지커넥터

표 1. 발전소 정보 및 사진(열화상, 전경)

설비 총 용량	450 [kW]	 
단위 모듈 출력	225 [W]	
어레이 구성	20직렬 27병렬	
태양광 접속반 수	7 Set	
인버터	250kW(Central) 2대	
설치형태	고정식 가변형 구조	

전소 외곽의 수목으로 인한 일부 스트링 음영 발생과 일부 스트링 PID 발생이 발견, 바이패스 다이오드의 고장을 열화상 이미지를 통해 확인할 수 있었다. PID가 진행된 스트링에 대한 전압-전류 특성곡선 측정결과는 그림 13과 같다.

그림 13에서 빨간색의 전압-전류 곡선과 전압-출력 곡선은 모듈의 정격데이터를 활용하여 시뮬레이션 한 결과 값이며, 기타 색의 곡선은 각 스트링의 측정값을 나타낸다. PID가 발생되는 경우에는 충전률이 시뮬레이션 값 대비

급격한 저하가 발생하게 된다. 그림 13의 결과로 미루어 볼 때, 해당 접속함의 성능은 시뮬레이션 대비 약 13%의 출력이 저하되는 운전되고 있는 것을 추정할 수 있다. PID 발생 어레이는 PID 박스를 통해 성능을 개선할 수 있는데, 해당 발전소는 PID 박스 설치를 통해 성능을 정상대비 98%로 약 10%이상 성능을 향상시켰다.

그림 14는 DC 어레이의 일부(스트링 내 다수 모듈의 음영) 음영과 조류 분비물에 의한 오염으로 인한 핫스팟 현상이

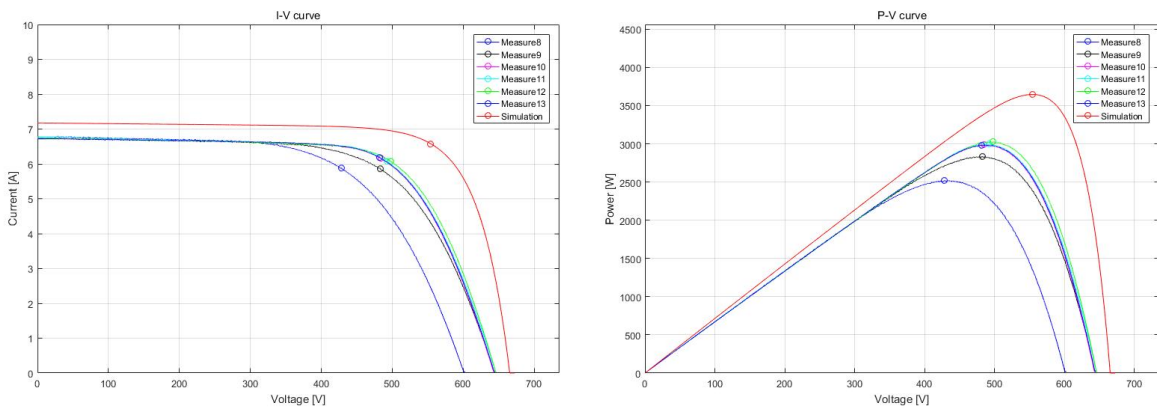
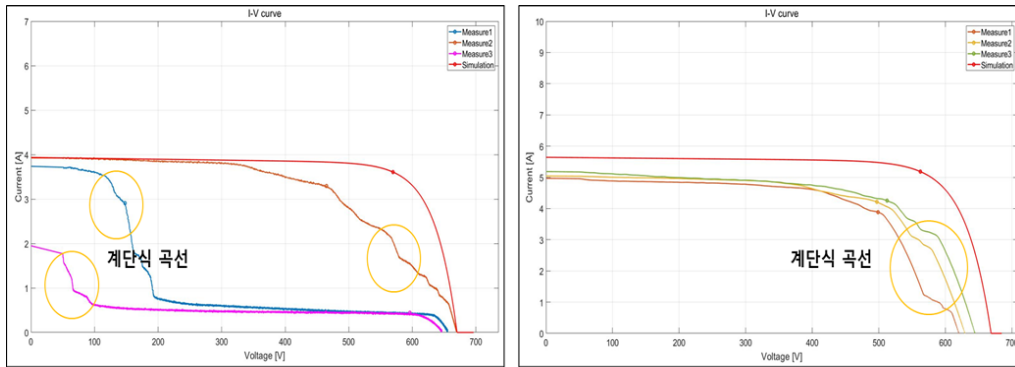
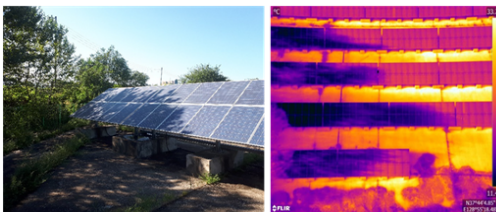


그림 13. PID 발생스트링의 전압-전류 및 전압-출력 특성곡선



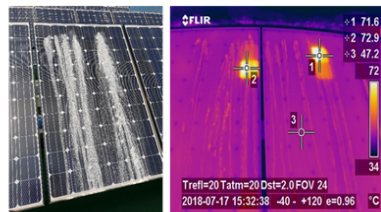
I-V 곡선



Visual Image

IR Image

(a) 수목에 의한 음영



Visual Image

IR Image

(b) 조류 분비물에 따른 음영으로 인한 핫스팟

그림 14. 모듈 표면 음영과 오염에 따른 PV 어레이 성능특성 사례

발생될 경우의 전압-전류 특성곡선을 나타낸다. 스트링 내 다수 모듈의 음영이 발생될 경우에는 태양전지 모듈 내 바이패스 다이오드가 다수 Turn-on 동작을 해서 최대동작전압에서 전류가 낮아지는 특성을 나타내고 있는 반면, 조류 등에 의한 모듈 오염에 의한 핫스팟 현상이 발생될 경우에는 특정 모듈 내 바이패스 다이오드만 동작을 했기 때문에 최대출력동작전압 근처에서 계단식으로 곡선이 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 시뮬레이션 출력과 측정 출력의 차이는 미스매칭 손실로서 표현되는 것을 확인할 수 있으며, DC 어레이 미스매칭은 최대출력 동작전압을 가변시킨다는 것을 확인할 수 있다.

결론

본 연구에서는 태양광 DC 어레이의 전압-전류 곡선을 시뮬레이션(모의)하기 위한 방안과 이러한 시뮬레이션이 적용된 전압-전류 특성곡선 측정 장치를 이용해 태양광 발전소에 대한 성능을 평가하는 방법을 제시하였다. 일사량(온도 포함)과 전압, 전류 모델 식을 선형회귀 방정식을 적용해 도출하였다. 도출된 전압 모델 식은 직렬저항(태양전지 셀의 종류나 버스바 수)과 병렬저항 성분 차이에 따라 변경 되므로 정확도 높은 모델 식 도출을 위해서는 일사량에 대응하는 추가변수(비선형)가 필요하게 됨을 알 수가 있었다. 다채널 전압-전류 특성곡선 측정 장치를 이용해 100kW급 접속함 단위의 측정 및 시뮬레이션을 통한 미

스매칭 손실과 운전되고 있는 발전소의 출력 성능평가가 가능하고, 전압-전류 특성곡선의 형상을 통해 고장의 원인과 해결 방안 도출이 가능하다는 것을 확인하였다. 국내 외 태양광 발전소에서는 고장으로 인한 성능저하가 발생된 채 운전되는 경우가 다수 있는 것으로 추정된다. 태양광 설비는 20년 이상 운전되어야 하며 점검미비로 인한 발전 성능 손실은 국가 에너지 정책수립에도 큰 위협이 될 수 있다. 이에 태양광 발전소에서 운전능력과 고장진단을 평가하고 안정적으로 발전소가 운영이 될 수 있도록 검사제도나 자체 성능 진단검사제도의 도입이 시급한 상황이다.

참고문헌

- [1] 산업통상자원부 “제5차 신재생에너지 기술개발 및 이용 보급 기본계획”, 2020.12.
- [2] 고석환 외, 태양광발전 O&M 기술 및 시장 동향, 2018.12.
- [3] 고석환 외, PV모듈의 음영 상태 및 바이패스 다이오드 단락 고장 특성 분석, 한국태양에너지학회, 36-4, pp 41-47, 2016.
- [4] 이충근 외, PV 모듈의 바이패스 다이오드 단락 고장 시 태양광어레이 회로특성 분석, 한국태양에너지학회, 39-6, pp 15-25, 2019.
- [5] Gray, J.L., The Physics of the Solar Cell, in Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, A. Luque, Hegedus, S., Editor. 2011, John Wiley and Sons.
- [6] Huawei homepage, <https://solar.huawei.com/en-GB/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fattachment%2Fpdf%2Fen%2Fdatasheet%2FIV-Curve.pdf>