



태양광모듈의 에너지수율 측정: 기존 접근방법과 모범사례

Photovoltaic Module Energy Yield Measurements:
Existing Approaches and Best Practice



PHOTOVOLTAIC
POWER SYSTEMS
PROGRAMME

국제에너지기구
태양광발전시스템
프로그램

윤김 윤 경 훈
한국에너지기술연구원

Report IEA-PVPS T13-11:2018

PVPS

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY
PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME

Photovoltaic Module Energy Yield Measurements: Existing Approaches and Best Practice

(태양광모듈 에너지수율 측정: 기존 접근방법과 모범 사례)

IEA PVPS Task 13, Subtask 3
Report IEA-PVPS T13-11:2018
May 2018

ISBN 978-3-906042-52-7

Primary authors:

Gabi Friesen
University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland (SUPSI),
PVLab, Canobbio-Lugano, Switzerland

Werner Hermann
TÜV Rheinland Energy GmbH, Köln, Germany

Giorgio Belluardo
European Academy (EURAC), Bolzano, Italy

Bert Herteleer
Ekistica, Alice Springs, Australia, formerly at KU Leuven, Gent, Belgium

Contributing authors:

Jürgen Sutterlütli
Gantner Instruments GmbH, Schruns, Austria

Anton Driesse
PV Performance Labs, Freiburg, Germany

Keith Emery
National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, USA

Markus Schweiger
TÜV Rheinland Energy GmbH, Köln, Germany

Korean translation June 2021, Yoon, Kyung-Hoon 한글 옮김 윤 경 훈

Korea Institute of Energy Research (한국에너지기술연구원)

목차

머리말	10
감사말씀	11
약어	12
요약	14
1 서론	18
2 배경 정보	19
2.1 시험의 범위	19
2.2 에너지수율 대 에너지등급	20
3 측정 관행에 대한 국제간 조사	21
4 시험환경과 하드웨어 요건	23
4.1 설치 구조와 환경	23
4.1.1 설치 랙의 배치	24
4.1.2 태양광모듈 설치	25
4.1.3 태양광모듈 음영	25
4.1.4 알베도	27
4.1.5 센서 위치지정	27
4.2 전류와 전압 측정	28
4.2.1 하드웨어 해결책	28
4.2.2 하드웨어 특성과 배치	31
4.2.3 권장사항	36
4.3 환경 파라미터의 측정	38
4.3.1 면내 조사강도	38
4.3.2 모듈온도	43
4.3.3 기상 데이터	46
4.3.4 분광 조사강도	47
5 데이터 품질 제어와 유지관리 관행	52

5.1	품질 마커.....	52
5.2	유지관리.....	52
6	시험 모듈의 특성분석.....	54
6.1	모듈 선정/샘플링.....	54
6.2	사전 시험과 제어 측정.....	55
7	데이터 분석과 리포트.....	57
7.1	모듈 에너지수율 벤치마킹.....	57
7.1.1	에너지수율 평가.....	57
7.1.2	STC 출력의 영향.....	59
7.1.3	온도, 조사강도, 입사각 그리고 스펙트럼의 영향.....	61
7.1.4	경감 인자의 계산.....	67
7.2	기후별 모듈 데이터의 비교.....	68
7.3	모듈 성능 손실을.....	73
7.3.1	방법론.....	73
7.3.2	성능 지표.....	74
7.3.3	필터링과 보정 기법.....	75
7.3.4	통계적 기법.....	77
8	측정 불확도 분석.....	81
8.1	서론.....	81
8.2	불확도 분석 방법론.....	82
8.3	단일 불확도 기여 요소들.....	82
8.3.1	STC 출력 U_{PSTC} 에서의 불확도.....	82
8.3.2	조사강도 U_G 와 조사량 U_H 에서의 불확도.....	83
8.3.3	측정된 최대출력 U_{Pmax} 에서의 불확도.....	83
8.3.4	핵심 성능 지수 U_E , U_{Ya} 및 U_{MPR} 에서의 불확도.....	84
8.4	상대 불확도.....	87
9	요약과 결론.....	88
	부록 1: 설문지.....	102

부록 2: 시험 시설 시트	124
부록 3: 영어 - 한글 용어 비교	139

머리말

1974년 11월에 설립된 국제에너지기구(IEA)는 경제협력개발기구(OECD)의 틀 내에서 회원국들 간의 포괄적인 에너지협력 프로그램을 수행하는 자치기구이다. 유럽연합도 여기에 참여한다. 새로운 기술의 연구, 개발과 실증에서의 협력은 프로그램의 중요한 부분이 되어 왔다.

IEA PVPS(태양광발전시스템 프로그램)는 IEA 내에서 수립된 공동 R&D 협약 중 하나인데, 1993년부터 IEA PVPS 참가자들은 태양에너지를 전기로 변환하는 태양광발전 응용 분야에서 다양한 공동 프로젝트를 수행해 왔다.

IEA PVPS 프로그램의 임무는 지속가능한 에너지시스템으로 전환하는데 태양광에너지가 핵심적인 역할을 하도록 국제협력을 강화하는 것이다. 기본 전제는 점점 더 많은 국가의 그리드 연결 시장에서 배전망과 중앙 송전망 모두 태양광시스템의 진출이 빠르게 확장되고 있다는 것이다.

이런 추세의 확장을 위해서는 태양광시스템의 성능과 지속 가능성, 기술과 설계지침, 계획방법, 자금조달 등에 대한 신뢰할 수 있는 정보를 다양한 주체와 공유할 수 있어야 한다. 특히 메인 그리드 내에서의 태양광 보급률이 높기 때문에 새로운 그리드와 태양광 인버터 관리전략을 개발하고 태양광 예측과 저장에 더 중점을 두어야 하며 전체 에너지시스템에 대한 경제적, 기술적 영향을 조사해야 한다. 태양광발전의 탈집중 분산화 특성으로 인해 에너지생산에 대한 책임이 개인 소유주, 지자체, 도시와 지역의 손으로 더욱 이동함에 따라 새로운 태양광 비즈니스 모델을 개발해야 한다.

IEA PVPS Task 13의 전반적인 목표는 기술성과 불량에 대한 정보의 수집, 분석을 통해 태양광시스템과 서브시스템의 신뢰성을 향상시키는 것인데, 이렇게 함으로써 태양광시스템의 평가기준을 제공하고, 시스템의 전기적 및 경제적 산출량을 개선시킬 수 있는 실제적인 권장사항도 개발하게 된다.

IEA PVPS Task 13의 현재 회원국은 다음과 같다:

호주, 오스트리아, 벨기에, 중국, EPIA, 프랑스, 독일, 이스라엘, 이탈리아, 일본, 말레이시아, 네덜란드, 노르웨이, 스페인, 스웨덴, 스위스, 터키, 미국.

이 보고서는 에너지수율 혹은 성능 평가를 목적으로 설치현장에서의 모듈 측정에 초점을 두고 있다. 이 보고서는 개별적으로 태양광모듈의 에너지수율 측정을 시작하려는 어떤 사람들도 스스로의 시험 설비를 구축하거나 혹은 제 3 자에 의해 측정된 결과를 해석하는데 필요한 기술적인 이해를 높일 수 있도록 하고자 한다.

이 보고서의 편집자들은 Gabi Friesen 와 Ulrike Jahn 이다.

이 보고서는 해당 주제에 대한 Task 13 전문가들 간에 국제적 합의를 본 의견을 최대한 반영한다. 작업의 활동과 결과에 대한 추가정보는 <http://www.ieapvps.org> 에서 찾을 수 있다.

감사말씀

This paper received valuable contributions from several IEA-PVPS Task 13 members and other international experts. For its support in reviewing the document and/or participation in the survey, many thanks go to (in alphabetic order):

Andreas Livera, University of Cyprus, PV Technology Laboratory, Cyprus.
Arjen de Waal, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.
Atse Louwen, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.
Bill Sekulic, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, USA.
Brian Dougherty, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, USA.
Carolin Ulbrich, Helmholtz Zentrum Berlin, Berlin, Germany.
Christopher Fell, CSIRO Energy Centre, Newcastle, Australia.
Christian Reise, ISE Fraunhofer, Freiburg, Germany.
David Moser, European Academy (EURAC), Bolzano, Italy.
Dean Levi, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, USA.
Erdmut Schnabel, ISE Fraunhofer, Freiburg, Germany.
George Makrides, University of Cyprus, PV Technology Laboratory, Cyprus.
Guillaume Razongles, Institut National de l'Energie Solaire (INES), Cadarache, France.
Haitao Liu, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, China.
Hélène Grandjean, Engie Laborelec, Linkebeek, Belgium.
Joshua S. Stein, SANDIA National Laboratory, Albuquerque, USA.
Karl Berger, Austrian Institute of Technology GmbH (AIT), Wien, Austria.
Marcus Rennhofer, Austrian Institute of Technology GmbH (AIT), Wien, Austria.
Matthew Boyd, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, USA.
Philip Ingenhoven, European Academy (EURAC), Bolzano, Italy.
Wilfried van Sark, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.

This report is supported by:

Swiss Federal Office of Energy (SFOE) under contract no.: SI/500021-06

German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) under contract no. FKZ 0325786 A_B.

U.S. Department of Energy under Contract No. DE-AC36-08GO28308 with Alliance for Sustainable Energy, LLC, the Manager and Operator of the National Renewable Energy Laboratory.

Funding provided U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Solar Energy Technologies Office.

본 보고서 한글 번역에 도움을 주신 IEA-PVPS 집행부와 Task 13 OA, 보고서의 저자들, 그리고 한국에너지기술연구원 태양광연구단 멤버들에게 감사인사를 전합니다.

2021년 6월 윤경훈 Yoon, Kyung-Hoon



약어

AM	Air mass
Aoi	Angle of incidence
APE	Average photon energy
DHI	Diffuse horizontal irradiance
DNI	Direct normal irradiance
E	Energy output
ECT	Equivalent cell temperature
ER	Energy rating
FF	Fill factor
G	Irradiance
G_i	In-plane (plane of array) irradiance
$G_{i,d}$	In-plane diffuse irradiance
$G_{i,b}$	In-plane direct beam irradiance
G_{eff}	Effective irradiance or spectrally sensitive irradiance
G_{stc}	Reference irradiance at standard test conditions
GHI	Global horizontal irradiance
GNI	Global normal irradiance
H	Irradiation
IAM	Incident angle modifier
I_{mp}	Current at maximum power point
I_{sc}	Short circuit current
IR	Infrared
KPI	Key performance indicator
LID	Light induced degradation
MM	Spectral mismatch factor
MPP	Maximum power point
MPPT	Maximum power point tracker
MPR	Module performance ratio
P_{nom}	Nominal power
P_{max}	Power at maximum power point

P_{stc}	Power at standard test conditions
$P_{stc,stab}$	Stabilized power at standard test conditions
PID	Potential induced degradation
PLR	Performance loss rate
POA	Plane of array
PR	Performance ratio
R_s	Series resistance
R_{sc}	Resistance at short circuit current
R_{oc}	Resistance at open circuit voltage
SIF	Spectral influence factor
T_{stc}	Reference temperature at standard test conditions
T_c	Cell temperature
T_{amb}	Ambient temperature
T_{mod}	Module temperature
T_{BS}	Back sheet temperature
ΔT_{CBS}	Difference between cell and back sheet temperature
u	Uncertainty
UV	Ultraviolet
V_{mp}	Voltage at maximum power point
V_{oc}	Open circuit voltage
w	Wind speed
Y_a	PV module (array) energy yield
Y_f	Final yield
Y_r	Reference yield
θ	Tilt angle
τ	Recording interval
γ	P_{max} temperature coefficient

요약

단일 태양광모듈의 모니터링은 태양광모듈의 성능, 수명 그리고 불량 메커니즘의 기술적 차이를 설명하고 이해를 높이는데 중요한 역할을 한다.

시장에서 태양광의 성장이 지속되면서 점유율이 커지고 그리고 기술의 적절성에 힘입어 모듈 수준에서 옥외 측정을 이행하는 이해당사자들이 지속적으로 증가하고 있는데, 주요 주체는 시험기관, 교정 시험소, 태양광모듈 제조업체 또한 현장에서의 비전문가들인 판매업자, 투자자 혹은 보험회사들이 과학저널부터 기술저널까지의 다양한 매체를 통해 위험도 평가 보고서에서 순수 상업용 출판에 이르기까지 그 결과를 공개하고 있다. 그러나 시험 방법이 서로 다르고 측정 불확도에 대한 신고서가 없어 이들 측정의 비교는 어렵게 된다. 이는 주로, 태양광모듈의 에너지수율 측정용의 규격화된 혹은 공인된 가이드라인이 없기 때문이다.

현재 가용한 2 개의 주요 기준 문서는 2012 년 소개된 DERLAB (European Distributed Energy Resources Laboratories)[1]과 2017 년 발간된 IEC 61724-1 "태양광시스템 모니터링용 기술 규격(Technical Standard for the monitoring of PV systems)[2]인데, 이는 단일 모듈 시험용의 모범사례 가이드라인이다. 첫 번째는 시험 목적이 서로 다른 것에 대한 구별 없이 일부 시험 요건의 정의에 한정되어 있다. 여기에서는 단일 측정 수준에서의 불확도 기여가 고려되어 있지 않고 불확도를 줄이는 방법에 대한 권고사항도 제공되어 있지 않다. 두 번째는 센서, 장비 정확도, 품질 확인과 성능 분석에 대한 상세 등 많은 누락된 측면을 언급하고 있지만, 단일 모듈 모니터링과 벤치마킹 조사에 대한 특별한 요건을 고려하고 있지 않다.

모듈 혹은 시스템 수준에서의 모니터링 간의 주요 차이는, 그 범위가 다른 것 외에도, 시스템 모니터링은 일반적으로 모듈 수준에서 도달 가능한 정확도를 확보하지 못한다는 것이다. 시스템 배치(예: 인버터 성능, 모듈 샘플링, 모듈 선정, 불일치 손실 등)와 시스템 전체의 공간상의 변화(예: 환기 통풍, 오염, 음영 등)와 관련되는 이차 영향은 핵심이 되는 기술적 차이와 모듈 수준에서의 모니터링 이유를 감추게 된다. 그리고 시스템 모니터링 규격은 성능, 수명 및 모듈 수준에서 이행된 불량 조사의 기본이 되는 IV-곡선 측정을 포함하지 않고 있다. 다른 한편으로, 시스템 모니터링은 AC 전류와 전압 혹은 여타 시스템 관련 전기적 파라미터 같이 모듈 모니터링에는 적합하지 않는 일부 측정을 포함하고 있다.

성능 혹은 신뢰성 조사 목적으로 특별히 설계된 소형 시스템은, 만약 모든 이차 불확도를 최소값으로 줄일 수 있고 그리고 DC 측과 기상 파라미터의 측정이 상호비교와 상세 분석이 가능할 만큼 충분하다면, 훌륭한 대안이 될 수 있다. 시스템 전체 시험의 단점은 더 많은 공간이 필요한 점과 특성을 분석하고 조사해야 할 모듈의 수가 더 많아지는 것이지만, 다른 한편으로 실제 시스템 스트레스 조건의 시뮬레이션이 더 잘 될 수 있고 통계적으로 더 적절한 수의 모듈이 측정될 수 있다. 스트링 내에서 단일 태양광모듈의 IV-곡선을 측정할 수 있는 새로운 하드웨어 솔루션은 이 접근방법을 더 매력적으로 만들 수 있어 가까운 미래에 확보 가능할 것이다.

이 보고서의 목표는 일부 규정의 빈틈을 채우고 그리고 개별 태양광모듈의 에너지수율 측정을 시작하고자 하는 모든 사람에게 도움을 주고자 하는 것으로, 구체적으로는 기술적 이해를 높이고, 자체의 시험 시설을 구축하는 방법 제공, 제 3 자에 의해 측정된 결과를 보다 잘 해석할 수 있도록 하는 것이다.

국제적인 주요 연구소와 시험기관들이 적용하는 개별 태양광모듈의 에너지수율 측정에 대한 현재의 관행들이 보고서에 소개되어 있다. 모범사례 권장과 에너지수율 측정을 개선하기 위한 방안들이 제시되어 있다.

IEA PVPS Task13 컨소시엄 내에서, 모듈의 에너지수율 측정을 평가하고 어떻게 불확도를 계산하고 최종 사용자에게 보고하는지에 대한 설문조사를 이행하였다. 전세계에 설치된 30 개 이상의 시험시설에서 태양광모듈 모니터링 경험을 가진 15 기관이 인터뷰에 응하였다. 연구개발 기관뿐 아니라 ISO 17025 인정 시험기관들이 포함되었다. 설문지는 시험 범위에 대한 일반적인 질문부터 시험 장비, 절차, 유지관리 관행, 데이터 분석과 보고서 작성에 이르는 모든 면을 커버한다.

태양광모듈 수준에서 모니터링을 하는 목적은 다음과 같이 다양하다.

- 특정한 환경조건과 스트레스 인자(열화 연구) 하에서 셀 기술의 안정성을 평가하기 위해,
- 단일 환경 손실인자(온도, 스펙트럼, 조사강도, 바람, 음영, 오염 등)를 이해하면서 기준 기술(벤치마킹 연구) 대비 과다- 혹은 과소-성능을 측정하기 위해,
- 그리고 에너지 추정 모델의 검증용 혹은 특정 모델용 태양광모듈 파라미터의 교정용 데이터의 수집을 위해.

모듈의 에너지수율 측정은 에너지등급에 관한 IEC 61853 규격의 검증용으로도 필요하다는 것을 언급할 필요가 있는데, 이 규격은 현재 작업 중에 있고 모듈의 표준시험조건에 따르는 현재의 출력 등급을 대체하려는 것이다[3,4,5,6]. 정확하게 결정된 불확도를 가진 고정밀 측정은 향후 에너지등급 도입을 앞당길 수 있는 열쇠이다. 그리고 보고서 IEA-PVPS T13-12:2018 '태양광시스템 수율 예측과 평가에서의 불확도(Uncertainties in PV System Yield Predictions and Assessments)' 에 기술된 것과 같은 에너지수율 추정이 이로부터 도움을 받을 수 있을 것이다.

반반하지는 않지만 옥외 측정을 모듈 특성분석 목적으로 실시하는데, 이는 대부분 옥내에서 솔라 시뮬레이터로 하는 것으로 그 측정 불확도가 잘 정의되어 있고 알려져 있다. 만약 특성분석이 옥외 조건에서 이행된다면, 일반적으로 이는 솔라 트랙커와 조사강도 및 온도 수준을 제어할 수 있는 다른 방법을 사용한다. 이 경우, 적분한 에너지수율은 관련이 없고 따라서 전기적 특성분석은 이 보고서의 범주에 있지 않다.

범주가 달라지면 시험장비와 데이터 분석도 달라지게 된다. 가장 적절하게 측정된 혹은 계산된 핵심성능지표(KPI)는 순간적 출력(instantaneous power: P), 에너지 산출량(energy output: E), 에너지수율(energy yield: Y_p), 모듈 성능비(module performance ratio: MPR) 그리고 성능 손실율(performance loss rate: PLR)이다. 출력 데이터의 측정 불확도는 측정 시스템을 구성하는 각 단일 요소의 측정 불확도만큼 측정 시스템과 그 배치 조건에 의해 달라진다.

이 보고서는 시험 시설을 구축하는데 고려되어야 할 가장 중요한 요건, 예를 들어 시험 랙의 배치와 모듈 및 센서의 설치 장착 지침에 대한 개요를 제공한다. 그리고 어떤 측정 아티팩트(예: 과도상태 혹은 용량성 영향, MPP 트래킹 오류, 부하 설정의 오류, 케이블 손실 등)와 부적절한 데이터 기록(예: 낮은 샘플링 속도, 동기화 오차 등)으로 인해 발생할 수 있는 최종 KPI 결정에서의 오차를 줄이기 위해 IV-곡선 트레이서 그리고/혹은 최대 출력점 트랙커 같은 전류/전압 측정 시스템을 어떻게 조합하고 배치하는지에 대한 개요도 제공한다.

교정 필요성, 오류성 데이터(예: 온도 센서 탈착, 센서 오염, 데이터 습득 오차 등) 그리고 유지관리 관행(육안검사, 청소 간격, 이메일 경보 등) 같은 가용한 품질관리 측정도 소개하고 있는데, 이는

측정 불확도를 증가시키는 드리프트, 불량 혹은 고장 같은 문제의 조기 탐지 가능성을 높여줄 수 있다.

최종 목표는, 장기간에 걸친 정확하고 신뢰할만한 데이터와 동일한 가이드라인에 따르는 다른 시험 시설에서 확보된 데이터와도 비교가능한 데이터를 확보하는 것이다. 그러므로 이들 데이터의 정량화와 문서화를 통해 어떻게 단일 측정 불확도를 줄일 수 있을 지에 대한 이해를 높이는 것이 매우 중요하다.

그러나 비록 모든 측정 불확도를 줄이더라도 서로 다른 태양광기술 사이의 적절한 상호 비교는, 태양광모듈이 잘 정의된 샘플링 절차에 따라 선정되고 그리고 STC 출력과 그 불확도가 알려져 있을 때만 가능하다. STC 출력은 실제로 파라미터 γ_s 와 MPR 계산의 불확도에 기여하는 주요 요소 중의 하나이다. 제조업체가 신고한 공칭 출력 P_{nom} 은 태양광모듈의 실제 출력과는 상당히 다를 수 있고, 그 측정 불확도는 문서화되는 일이 드물며 상업용 마케팅 전략의 대상이 되기 때문에 일반적으로 상호비교 목적으로는 적절성이 떨어지는 것으로 간주된다. 제품의 벤치마킹용으로 가장 적합한 값은 불확도를 이미 알고 있고 설치 후 변화가 없는 실제 STC 출력이다. 마지막 측면은, 모듈이 STC 출력 측정 전에 안정화되어 있지 않으면 결과가 오도될 수 있기 때문에 중요하다. 일반적으로 측정 불확도가 더 낮을수록 그리고 현장에서의 안정성이 높을수록 순위 매김의 정확도는 더 높아진다. 인정 시험기관에 의해 이행된 고 정밀 측정과 검증된 안정화 절차는 정확도를 최고에 이르게 한다. 일반적으로 태양광모듈의 설치 전에 전기적 특성분석과 광학적 검사를 이행하면 낮은 품질, 결함이 있는 혹은 손상된 모듈이 선택될 가능성이 전혀 없다.

특정 기후조건에서 태양광기술의 차이를 이해하고 하나의 태양광기술이 다른 것에 비해 과대- 혹은 과소-평가 성능인지를 판단하기 위해서는 표준시험조건 하에서의 출력과 대비한 개별적인 손실요인이 정량화되어야 한다. 특정 조건(예: 확산 빛의 비율이 높고, 고온, 입사각이 높은 경우 등)에서 손실을 최소화 시킬 수 있는 기술선정을 가능하게 해주는 단일 경감 인자를 계산하기 위한 여러 접근방법이 존재한다. 손실을 계산하기 위해서는 제어된 실험실 조건에서 모듈의 완전한 전기적 특성분석 혹은 IV-곡선의 모니터링이 필요하다.

모듈의 은행성(bankability) 측면에서, 열화율은 모듈의 전기적 파라미터에 의해 주어지는 즉각적인 성능에 대한 자세한 지식보다 더 중요하다. 장기적으로, 연간 성능손실은 전기적 파라미터보다 수명 기간의 생산성에 더 큰 영향을 미친다. 환경이 노화 프로세스에 미치는 영향에 대해서는 알려진 것이 훨씬 더 적다. 이런 이유로 많은 시험기관이 장기 측정 캠페인과 PLR 의 계산에 초점을 두고 있다.

결정된 KPI 과는 무관하게 편차는 그 값이 측정 불확도보다 더 높을 때만 의미를 가진다. 측정 불확도의 크기가 조사된 환경 영향보다 더 커서 이를 고려하지 않고는 벤치마킹 혹은 열화 연구 목적으로 결과를 사용할 수 없게 되는 상황들이 있을 수 있다. 불확도에 대한 지식과 불확도 축소는 이런 측정을 이행하는 모두에게 의무사항이어야 한다. 때때로 절대 측정과 상대 측정 사이에는 구분이 있어야 한다.

일반적으로 PVPS Task 13 전문가 그룹 내에서 수행된 설문조사 결과는 대부분의 기관 내의 측정 불확도와 과학적인 상세 설명의 수준이 매우 높다는 것을 보여주고 있다. 이는 고정밀 장비의 반복적 사용, 양호한 측정 관행 및 양호한 품질관리와 유지관리 관행에 의해 입증되고 있다. 그럼에도 불구하고 설문조사는 서로 다른 옥외 데이터의 비교가능성 및 이 데이터를 모델 검증용으로 사용하는 측면에서 일부 한계도 드러내 보였는데, 이는 주요 핵심성능지표(KPI)에 대한 통일된 합의와 측정 불확도 가용성의 한계 때문이다. 이에 대한 주요 이유는, 측정 불확도가 지난

수년 동안 집중적으로 조사되고 검증된 솔라 시뮬레이터를 사용하는 STC 성능의 측정에 비해 에너지수율 측정에서는 시험조건의 재현성이 가능하지 않으며 측정 불확도의 결정은 훨씬 더 복잡하기 때문이다. 불확도는 실제 사이트와 시간 의존적이며 추정하기 어렵고 문헌에 잘 기술되지 않은 많은 인자들에 의해 영향을 받는다.

에너지수율 측정의 비교가능성을 향상시키기 위한 첫 번째 스텝은 주요 불확도 기여요인에 대해 동의하고 측정 불확도 보고에서 공동의 접근방법을 제안하는 것이다. 이 보고서는 미래 프로젝트에서 주요 불확도 기여 요소들을 어떻게 줄이고 어떻게 계산하는지에 대한 권장사항을 제공한다. 국제간의 라운드 로빈을 통해 모범사례 접근방법을 이행하고 검증하는데 많은 노력을 기울여야 한다.

1 서론

태양광시장은 고속 성장 중으로, SolarPower Europe에 따르면 2017년 전세계 설치량이 약 80 GW에 달할 것으로 예상하고 있고[7], 유럽의 경우에는, 2020년까지 전기 수요의 12 %를 달성할 것으로 추정하고 있다. 기술의 활용을 더 확대시킬 수 있는 핵심 인자는 Solar Europe Industry Initiative (SEII)에 의해 강조된 바와 같이 수명 기간의 에너지 산출량을 증가시켜 태양광 발전단가를 낮추는 것이다. 이는 시스템의 지속적이며 믿을 수 있고 원인 추적 가능한 모니터링을 통해 신뢰성과 사용 기간 동안의 성능 향상으로 달성할 수 있다. 또한, 보다 정확하고 규격화된 성능, 에너지수율 및 수명 시험이 가능한 기술개발이 이루어져야 한다. 이는 투자자와 소유주들에게는 투자 위험도를 낮추어 주게 될 것이고 기술 제공자에게는 보다 효율적인 연구개발 피드백을 제공해 줄 수 있을 것이다.

시험 시스템에서의 품질 운영을 보장하는데 있어 핵심은 신뢰성과 양호한 성능을 확보하는 것이다. 한편으로 이는 견고한 성능 모니터링을 통해 설치 초기단계에서 혹은 발생 전에 가능한 불량들을 탐지하고 진단하면서 다양한 성능 손실 메커니즘의 배경이 되는 인자들을 확인하고 정확히 정량화함으로써 가능하다.

이 모든 것들은 시스템과 모듈 수준에서 독립적이고 고품질의 모니터링 및 시험 개념을 필요로 한다. 전체적으로 설계된 하드웨어, 소프트웨어와 센서 등을 구비한 연구를 통해 시험의 기반시설 혹은 위치와는 무관하게 신속하고 반복 가능한 방식으로 손실요인을 분리하고 그 경향들을 확인할 수 있게 될 것이다.

모듈과 시스템 수준에서 에너지수율 측정방법과 초기 결함 탐지 방법의 개발을 통해 예방차원의 유지관리 전략과 보다 신뢰성 있는 실시간 예측이 개선됨으로써 정확한 에너지수율과 수명 예측이 가능하게 될 것이다. 그 결과로 발전소는 더 오랜 기간 양호한 상태에서 작동하고 수익의 손실도 최소화되므로 균등화발전단가(LCoE)와 투자비용에 직접적으로 영향을 미치는 시스템 성능 목표와의 간격이 줄어들게 될 것이다. 예를 들어, 에너지수율 측정의 불확도가 연간 1 %까지 감소하면, 연간 수익은 약 500 백만 Euro 증가하게 된다.

이렇게 하여 견고하고 추적 가능한 연구개발과 산업용 모니터링 솔루션 노력은 보상받게 된다.

2 배경 정보

이번 장에서는 통상적으로 태양광모듈의 옥외 측정이 이루어지는 범위를 요약하고 에너지수율과 에너지등급 측정 사이의 차이를 설명하고자 한다.

2.1 시험의 범위

현장에서 단일 모듈을 시험하는 이유는 여러가지 복합적으로 단일 범주에 제한되어 있지 않다. 가장 흔한 이유들은 다음과 같다.

1. 모듈 벤치마킹 목적의 에너지수율 측정[8,9,10]. 어떤 태양광기술이 다른 기술에 비해 성능이 더 좋은지 그리고 어떤 환경조건 하에서 좋은지 하는 질문이 제기된다. 태양광모듈의 에너지수율 (Y_a) 혹은 모듈 성능비 (MPR) 는 가장 널리 사용되는 2 가지 성능 지표이다. 확인된 차이의 원인을 잘 이해하기 위해 완전한 IV 곡선을 토대로 한 과학적인 모니터링이 추가로 필요하다. 이 시험의 통상적인 기간은 1 년으로 데이터 손실률이 낮다는 것을 전제로 한다. 모듈 에너지수율 측정을 2.2 장에서 기술한 에너지등급과 혼동하여서는 안 된다.
2. 중장기 열화율 및 성능 손실률(PLR)의 측정과 여러 가지 환경조건 하에서 열화 메커니즘의 조사[11,12,13,14,15]. 일반적으로 이런 유형의 시험은 최소 3 년의 장기 노출 기간과 가장 적절한 환경 파라미터의 모니터링을 필요로 한다.
3. 기존 혹은 새로운 에너지 예측 모델의 검증용으로 고품질의 시계열 측정[16,17]. 여기서의 강조점은 데이터의 정확성과 입력되는 기상 파라미터와의 양호한 동기성이다. 이런 목적으로는 일반적으로 1 년의 시계열로 충분하다.
4. 모듈 특성분석의 범주 측면에서, 다양한 시험조건 하에서 모듈의 성능측정. 목표는 특정 성능 모델(예: LFM [18], SAM [19], PVSYSY[20]) 혹은 IEC 61853 규격 part 1 [21]에 따른 성능 매트릭스에 필요한 파라미터를 모듈에서 추출하는 것이다. 보다 신속하고 더 정확하다는 장점 때문에 대부분의 측정은 2-축 트랙커 위에서 수행하고 고정 랙에서는 하지 않는다. 솔라 트랙커로는 입사각의 제어가 가능하고 조사강도 및 모듈온도는 감쇠 필터나 혹은 개별적인 온도 장치로 제어가 가능하다.
5. 에너지수율과 프로토타입의 내구성 시험과 최적화 (예: 혁신 기술, 새로운 소재나 혹은 모듈 구성). 핵심은 기존 모듈과의 차이를 부각시키고 제품 개발자에게 단시간에 결과를 제공하는 것이다.
6. 음영 혹은 오염 손실[22], 열적 손실[23,24,25], 혹은 퍼텐셜 유도 열화(PID)에 의한 손실 같은 특정 성능손실의 측정과 조사. 요구되는 시험조건을 시뮬레이션하거나 혹은 추가적인 파라미터를 모니터링하기 위해서는 규격화된 시험설비와 시험절차에서의 변화가 필요하다. 이런 변화는 예를 들어, 음영 변화 시나리오나 후면 절연을 바꾼다든지, 외부 바이어스 전압의 인가와 열적 분포 및 누설 전류의 모니터링 등으로 구성된다.

2.2 에너지수율 대 에너지등급

앞에서 기술한 바와 같이, 단일 모듈의 에너지수율 측정을 흔히 에너지등급 측정으로 잘 못 부르는 경우가 많다. '에너지등급(Energy Rating: ER)'과 '에너지수율' 측정 사이의 혼동을 피하기 위해 아래에서 간략하게 기술하고자 한다.

ER 접근방법은 IEC 61853 시리즈 규격에 기술되어 있는데, 이는 출력(watts), 에너지(watt-hours)와 성능비를 바탕으로 하여 태양광모듈의 성능을 평가하는데 필요한 요건을 제정하는 것을 목표로 하고 있다. Part 1 은 조사강도와 온도 수준을 바꾸면서 태양광모듈의 출력등급 측정을 다루고, 입사각 영향, 분광응답 및 작동온도 결정용인 Part 2 는 공개되어 있고 이미 에너지 예측에서의 불확도를 크게 줄이는데 기여하고 있다. 에너지등급 계산용의 방법론을 기술한 Part 3 과 다양한 기후지역을 커버하는 표준 기상 데이터셋을 정의한 Part 4 는 개발의 초기단계에 있다. 여러 필자들이 단일 측정의 불확도가 최종 에너지수율 계산에 어떻게 파급되는지를 기술한다[26,27,28].

에너지수율 측정과 에너지등급 사이의 주요 차이는, 전자는 특정하지 않은 기간 동안 실제 작동조건과 특정 기후조건 하에서의 측정인 반면, 후자는 규격화된 조건 하에서 순수 계산에 의한 것이다. 에너지수율 측정이 대표성을 갖기 위해서는 만 일년을 포함해야 하고, 그 결과는 측정된 사이트에 한해서만 유효하다. ER 의 측정은 훨씬 더 짧은 기간 내에 수행할 수 있고, 위치가 달라져도 계산이 가능하다. IEC 61853 의 Part 1 은 모듈의 출력등급에 관한 것으로 3 가지의 접근방법 - 트랙커를 사용하여 자연 태양광에서의 절차(8.3 절), 트랙커 없이 자연 태양광에서의 절차(8.4 절) 그리고 솔라 시뮬레이터를 사용한 절차(8.5 절) - 을 기술한다. 솔라 시뮬레이터나 혹은 솔라 트랙커를 사용하는 방식이 가장 많이 사용되고 반면에 두 번째 고정 랙에서의 방식은 거의 사용되지 않는다. 그 이유는, 앞의 두 방법이 훨씬 잘 기술되어 있으며 검증되었고[21,29] 그리고 고정 랙에서 수행할 때는 측정의 불확도가 더 높기 때문이다.

여기서 강조되어야 할 점은, 에너지수율 측정은 모든 관련 규격에서의 ER 검증에 그리고 특별히 이를 신기술에 확장시킬 때 필수적이라는 것이다. 그러므로 정확하게 결정된 불확도를 가진 고정밀의 측정은 매우 중요한 것이다.

3 측정 관행에 대한 국제간 조사

측정 관행의 현황을 평가하기 위해 PVPS IEA TASK 13 시험소 간에 국제간 조사를 시행하였다. 단일 모듈에 대해 옥외측정을 수행하는 모든 회원기관들이 참여 초대를 받았다. 연구는 IEA Task 13 컨소시엄 내에 확인된 15 멤버에게 주어지는 설문조사 방식으로 추진하였다. 설문지는 부록 1 에서 확인할 수 있는데, 모든 파트너들이 응답하고 설문을 완성하였다. 부록 2 는 각 참여기관의 시험 기반시설을 소개하는 짧은 정보를 담고 있다.

설문지를 통해, 모듈의 에너지수율 측정이 전세계적으로 어떻게 이루어지고 불확도는 어떻게 계산하고 그리고 최종 사용자에게 어떻게 보고하는지에 대한 상세한 정보를 수집하였다. 설문지는 시험범위에 대한 일반적인 질문부터 시작하여 참여기관의 경험, 사용된 시험장비, 시험절차 그리고 유지관리 및 데이터 분석 방법 등 모든 측면을 커버한다.

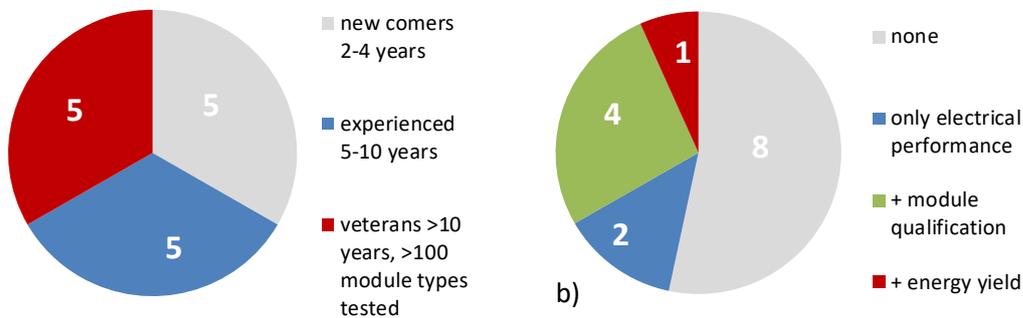


그림 1: 모듈 옥외시험을 하는 설문 참여기관의 경험(a) 과 ISO 17025 인정의 유형 (b).

그림 1a 와 같이 15 개 참여기관의 1/3 은 태양광모듈 옥외시험과 관련한 베테랑들이며, 이 분야가 그들의 주요 활동분야의 하나 (현장에서 10 년 이상의 경험과 시험한 모듈 유형이 100 개 이상)이고, 다른 1/3 은 옥외시험을 수년간 수행 중에 있지만 베테랑들에 비해서는 덜 집중적이고 (5~10 년의 경험과 시험 모듈 유형의 개수가 더 적음) 그리고 나머지는 신규로 진입한(newcomers) (2~4 년의 경험과 대부분 시험설비들이 더 적음) 기관들이다. 설문이 IEA 컨소시엄에 한정되었음에도 불구하고, 오늘날 모듈의 옥외시험 관행의 상황을 잘 대변하고 있고 해당 정보는 이런 유형의 시험을 하는 기관에게 기준으로서의 역할을 할 수 있을 것이다. 시험기관의 유형은 그림 1b 와 같다. 15 개 기관 중 7 개는 ISO 17025 인정을 받은 시험기관이다. 2 개 기관은 한 개 이상의 IEC 규격 (예: IEC 60904-x, IEC 61853-x)에 따라 태양광모듈의 전기적 특성분석에서만 인정을 받았다. 그 나머지 4 개 기관은 IEC 61215 에 따른 모듈 적격성 시험 분야에서 인정을 받았다. 1 개 기관만이 여기에서 언급하고 있는 단일 모듈의 에너지수율에 대한 인정을 받았다. 그 이유는, 실제 옥외조건 하에서 태양광모듈의 에너지수율 측정을 기술한 규격이 없기 때문이다. 여기서의 인정은 자체로 정의한 절차에 따라 이루어진 것이다. 인정을 받지 않은 8 개 기관은 대부분 대학교, 국가연구소 및 상업용 목적으로 측정을 수행하는 소수의 사기업이다. 1 개 기관을 제외하고, 인정을 받지 않은 시험기관은 자체 솔라 시뮬레이터를 갖고 있지 않다. kWh/Wp 단위로 에너지수율 계산을 위해서는 제조업체의 출력 측정(flasher list values), 다른 시험기관이 수행한 측정 혹은 옥외 데이터로부터 외삽한 STC 출력값에 의존해야 한다. 이 점이 미치는 영향에 대해서는 7.1.2 절에서 논의할 것이다.

그림 2 는 15 개 기관에 의해 수행된 옥외 시험 범위의 빈도수를 보여주고 있는데, 범위에 대해서는 2.1 장에서 기술한 바 있다.

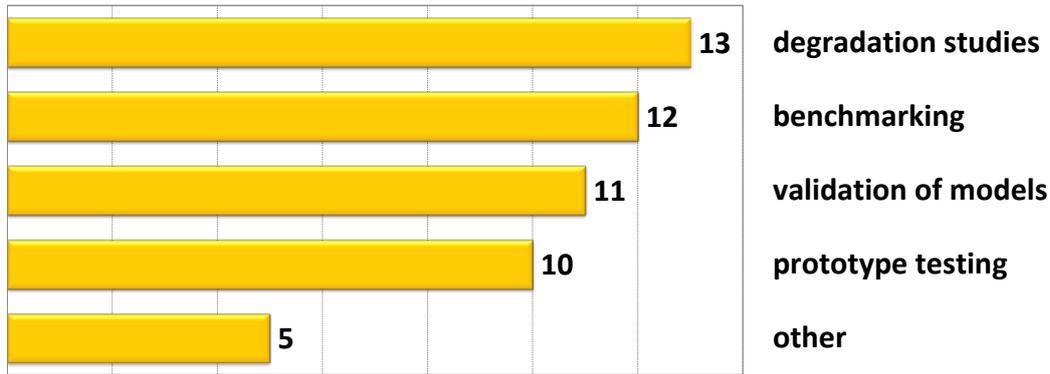


그림 2: 15 개 조사 참여기관 내에서 모듈 옥외시험의 목적에 대한 조사 피드백.

참여기관의 상당수는 다른 기후대에 있는 옥외 시험설비를 가동한다. 조사는 관련 있는 모든 기후대 - 따뜻하고 온건한, 매우 건조, 대륙성, 적도와 고산 - 에 위치한 33 개 시험설비를 포함한다. 결정질실리콘부터 박막기술까지 모든 핵심기술들이 시험된다. 그림 3 은 시험설비들이 전세계에 기후대별로 분포된 것을 보여준다.

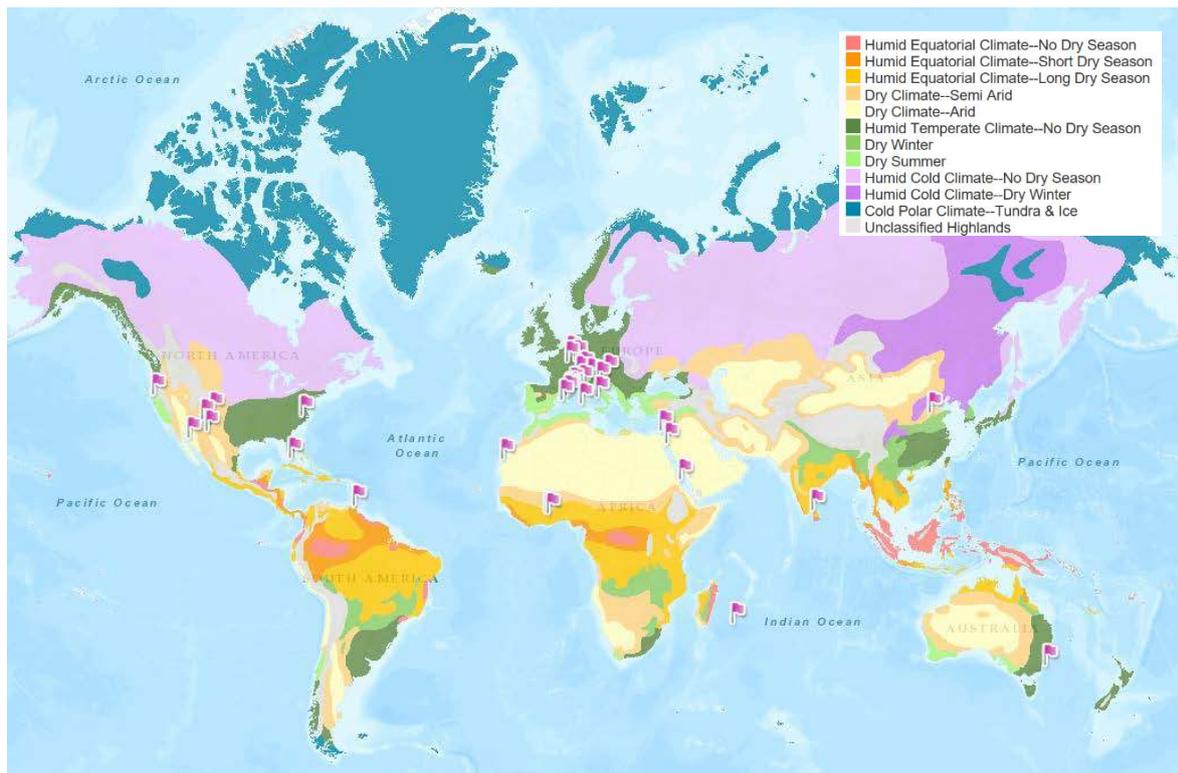


그림 3: 조사에 참여한 기관들이 운영하는 33 개 옥외 시험설비의 분포를 보여주는 기후 지도(국기로 표시).

4 시험환경과 하드웨어 요건

여러 필자들에 의해 논의된 바와 같이[31,32,33], 중장기 옥외 측정의 불확도와 신뢰성은 여러 파라미터에 의해 영향을 받는다. 측정의 정확도는 측정 시스템 자체와 함께 측정 시스템 주위의 조건에도 의존한다. 이번 장에서는 시험설비의 구축에 고려해야 할 가장 중요한 요소들을 소개하고, 개별 하드웨어 구성 부품의 영향에 대해 논의하고자 한다. 국제 전문가들의 설문조사로부터 도출된 모범사례를 그 완전한 기술적 상세와 일반적인 권장사항과 함께 소개한다.

4.1 설치 구조와 환경

정확한 에너지수율 측정을 위해서는 전 기간에 걸쳐 최적 시험조건이 보장되어야 한다. 이는 어떤 데이터건 거부되면 에너지 생산 집계에서의 불확도를 증가시키기 때문이다. 이러한 고려사항은 설치대 구조와 주위 환경에 대해 특정한 요건을 필요로 하게 된다.

설문 참여기관들이 가장 널리 사용한 설치(mounting) 배치 형태는 오픈 랙(open-rack) 방식으로 지리적 위치에 맞게 기울기와 방향을 최적으로 유지한다. 예를 들어 BIPV 혹은 양면형 모듈 같은 특정 모듈의 시험을 위해서는 방향과 경사도 혹은 후면 절연의 유무 등 다른 배치 형태가 사용된다. 한 시험기관은 단기 측정 목적으로 2-축 트랙커를 사용한다.

오픈 랙 설치대 모듈의 요건에 대해 논의를 이어갈 것이지만, 이들 요건은 다른 배치 형태에도 적용된다. 요건으로부터 벗어나게 될 때의 영향은 모니터링 데이터와 관련된 측정 불확도를 분석할 때 평가 고려되어야 한다.

여기서 논의할 핵심 인자는 다음과 같다.

- 설치 랙 레이아웃
- 태양광모듈 설치
- 태양광모듈 음영
- 알베도(albedo)
- 센서 위치 지정

설문조사는, 주위환경과 모듈 설치가 시험 현장의 불균일성에 미치는 영향에 대해서는 체계적으로 측정된 것이 거의 없다는 것을 보여주었다. 대부분의 경우 추정하거나 혹은 명시되지 않는다. 조사강도는 흔히 무시할 정도이거나 1 % 미만으로 가정하고, 반면에 온도의 경우에는 1°C에서 8°C까지 큰 편차가 있는 것으로 신고하였다. 이들 값은 고려되는 조건에 의존하는데, 후면 환기, 모듈의 높이, 모듈 사이의 거리 및 모듈의 본질적인 차이 등이다. 신고된 모듈 정열 불량률의 최대값은 0.5~2°이지만 설문 참여기관의 1/3은 어떤 값도 밝히지 않았다. 설문은 또한 지상 혹은 지붕 위 모듈의 높이에 있어서도 큰 차이를 보여주었다. 9개 응답기관 중 일부는 모듈의 높이를 지면 20~50 cm 위로, 다른 경우에는 1~3 미터로 보고하였다. 나머지 기관들은 높이에 대해 명시하지 않았다.

아래에서는 어떻게 하면 시험설비를 좀 더 통일시킬 수 있을지에 대해 제안하고자 한다. 일부 일반 규칙은 DERLAB의 발간물에서 찾아 볼 수 있다[1].

4.1.1 설치 랙의 배치

태양광모듈용 설치 랙(mounting racks)은 지리적인 위치에서 연간 최대의 일조량을 받을 수 있도록 기울기와 방향을 설정한다. 최적 경사각은 위도에 의존한다. 최적 기울기 각도를 찾는 다양한 권장사항은 다음 사이트에서 찾을 수 있다. <http://www.solarpaneltilt.com>:

- 위도 < 25° 이면 위도 x 0.87. 그러나 강우에 의한 태양광모듈의 자체 청소를 위해서는 최저 경사각이 10°는 되어야 한다.
- 위도 25° ~ 50° 이면 위도 x 0.76 에 3.1 도를 더하기.
- 위도 50° 이상이면 45°의 고정 경사각 사용.

측정에서의 일관성 없음을 피하기 위해서는, 시험 모듈과 조사강도 센서가 동일면에 위치하여 동일한 경사각과 방향을 갖도록 시험 랙을 배치하여야 한다. 시험 모듈과 기준 소자(조사강도 센서) 사이의 어떤 정렬불량도 측정 오차를 불러온다. 그러므로 태양광 소자들이 다른 설치 랙에 위치할 경우 특별한 주의가 필요하다.

참여기관들의 시험 현장에서 모듈의 정렬불량은 0.5~2 %로 신고되었고, 조사강도 센서들은 모듈의 3 % 내에 있는 것으로 조사되었다. 참여기관의 1/3 은 어떤 값도 명시하지 않았다.

정렬불량에 의한 측정 오차는 소자들 사이의 코사인 각도에 직접 연관이 된다. 그림 4는 정렬불량 각도별로 입사각 함수에 따른 이 코사인 오차를 보여주고 있다. 조사강도 피크 시간(입사각 < 45°) 동안 조사강도 차이를 1 % 이하로 유지하기 위해서는 정렬불량이 0.5° 이하로 유지되어야 한다. 태양광모듈의 에너지수율 측정은 통상적으로 더 넓은 범위의 입사각에 걸쳐 있음을 주목해야 한다. 입사각 > 50° 인 경우, 0.5°의 정렬불량이 1% 이상의 측정 오차를 발생시킬 수 있다.

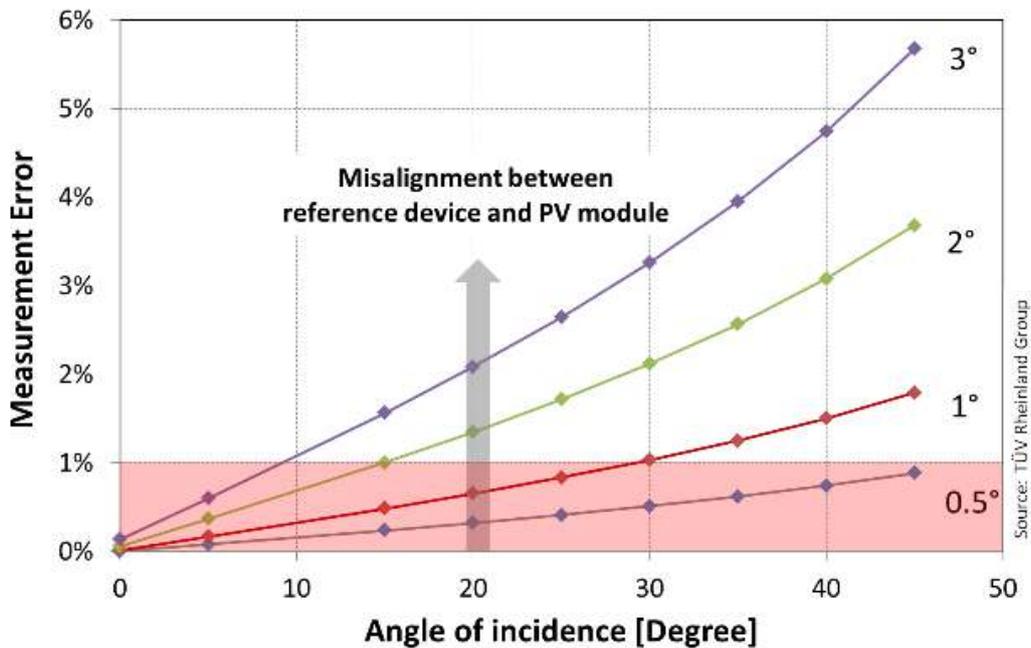


그림 4: 태양광 소자의 정렬불량에 의한 측정 오차.

4.1.2 태양광모듈 설치

태양광모듈 설치 랙의 배치형태는 태양광모듈 길이 방향의 온도 분포에 큰 영향을 미칠 수 있다. 높은 온도의 모듈 후면이 저온의 설치 랙에 매우 가까우면 통상적으로 복사 열교환에 의해 모듈 온도 구배(gradient)가 발생하게 된다. 이러한 경우, 모듈온도를 측정할 대표적인 위치를 찾는 것이 어려워진다. 그러므로 모듈에서의 어떤 불균일성(non-uniformities)을 확인하기 위해 800 W/m² 이상의 조사강도에서 전체 시험 모듈의 적외선 이미지를 취하게 되는데, 불균일성 문제는 이 때 다룬다.

경사진 랙 위에 거치된 태양광모듈의 경우, 보통 아래에서 위 방향으로 온도 구배가 관찰된다. 온도 프로파일은 시험 시료 주위의 공기 순환에 크게 좌우된다. 원치 않는 불균일성 영향을 줄이기 위해 시험 모듈은 적어도 지상 1 미터 이상 그리고 다른 물체로부터 적어도 10 cm 거리를 두고 설치하여야 한다.

보통 같은 줄의 왼쪽과 오른쪽에 위치한 바깥 모듈은, 특히 풍속이 높고 그리고 동-서 방향 풍향을 가진 지역에서는 바람에 의한 강제 대류가 증가하면서 작동온도가 더 낮아진다. 시험 중인 모듈에 대한 환경 변화의 영향을 줄이기 위해 이런 경우에는 추가적으로 더미 모듈을 설치할 수도 있다. 그렇지 않으면 개별 모듈은 불리하거나 혹은 유리한 조건에 놓일 수 있다.

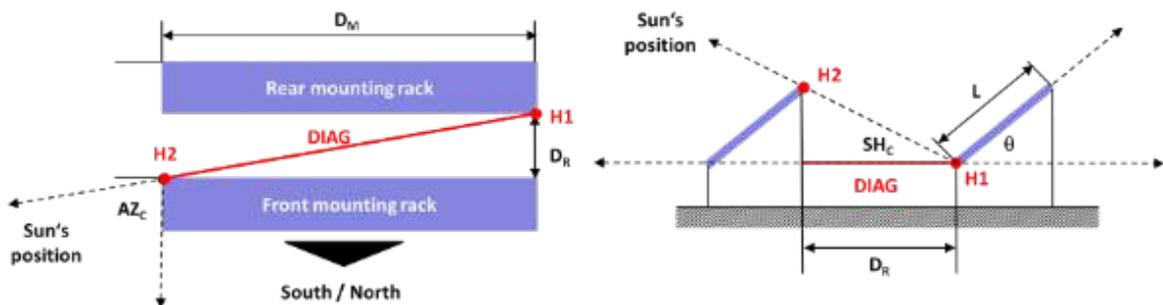
4.1.3 태양광모듈 음영

특정 위치에서 모듈의 연간 에너지수율의 정확한 측정을 위해서는 폐기되는 데이터 포인트가 적어야 하고 데이터의 가용성이 높아야 한다. 기본적으로 빌딩, 나무 혹은 담장과 같은 이웃하는 물체에 의해 모듈에 음영이 발생하지 않아야 된다. 음영은 높이가 있는 주변 풍경이나 혹은 높은 입사각 조건에서 태양광모듈 설치용 클램프에 의해서도 발생할 수 있다.

시험사이트에 대한 일반적 음영 분석용으로 상업적으로 가용한 다양한 음영 분석 도구들이 있는데, 이는 전체 사이트의 360 도 파노라마 뷰 위에 일년 동안 태양의 경로 다이어그램을 중첩시켜 보여준다. 이는 하루 중 일년 중 어느 시점에 어느 지점에서 태양이 주위 환경과 교차하는지를 보여준다. 다른 방안으로 일부 CAD 소프트웨어를 사용하여 사이트의 음영을 모델링할 수 있다.

태양광모듈의 에너지수율 측정용 시험 시설은 여러 개의 설치 랙으로 구성할 수 있다. 이 때 그 앞에 설치된 다른 모듈에 의해 태양광모듈에 그림자가 생길 수 있다. 이런 줄 간(랙 간의) 음영은 음영 한계각도(shading limit angle)에 의해 정의된 것보다 태양의 위치각이 낮을 때 발생한다.

그림 5 는 평행하게 설치한 2 개의 랙 배열에서 어떻게 음영 한계각도를 계산하는지 보여준다. 태양의 방위각과 고도각(SAC/SHC)은 주로 랙 간의 간격(DR)과 랙 경사각(θ)에 의존한다. 랙 사이가 가까울수록 앞에 있는 모듈에 의해 뒤에 있는 모듈에 음영이 더 많이 발생한다.



- L** PV module length
- θ** PV module tilt angle
- D_M** Right-to-left distance of PV modules on mounting rack
- D_R** Module-to-module distance between mounting racks
- H1** Height of PV module bottom on rear mounting rack above ground
- H2** Height of PV module top on front mounting rack above ground
- DIAG** Length of diagonal (projection of points H1 and H2 to the ground)
- AZ_c** Shading limit angle for sun azimuth (SA_c)
- SH_c** Shading limit angle for sun height (SH_c)

$$H2 = H1 + L \cdot \sin(\theta)$$

$$DIAG = \sqrt{D_R^2 + D_M^2}$$

$$SA_c = 90^\circ - \arctan\left(\frac{D_R}{D_M}\right)$$

$$SH_c = \arctan\left(\frac{L \cdot \sin(\theta)}{\sqrt{D_M^2 + D_R^2}}\right)$$

그림 5: 설치 랙을 평행하게 배열한 형태에서 음영 한계각도의 계산. 음영 한계 좌표(shading limit coordinates)는 (SA_c , SH_c).

음영 한계각도 이상에서 일어나는 확산 조사강도에 의한 2 차 음영의 영향은 광선 추적법(raytracing)으로 추정할 수 있다. 그러므로 확산(특히 태양주위를 도는) 조사강도의 음영 손실을 피하기 위해서는 계산된 음영 한계각도가 적어도 5° 까지 커져야 한다.

그림 6 은 다음과 같은 어레이 배치 형태에서 일년 중의 음영 영향을 보여준다: 위도: 40° N, 태양광모듈 길이(L): 2 m, 태양광모듈 경사각(θ): 35°, 행간 간격(D_R): 4 m, 행의 길이(D_M): 15 m. 이렇게 계산된 음영 한계각도 $SA_c=75.1^\circ$ 와 $SH_c=4.2^\circ$ 를 해당 위치의 태양 경로 차트로 옮기면, 이 포인트는 10 월 12 일과 2 월 28 일의 태양 경로 위에 놓인다는 것을 보여준다. 이는 음영이 태양의 고도가 더 낮고 방위각이 더 남향일 때만 일어난다는 것을 의미하는데, 기간으로는 10 월 12 일부터 2 월 28 일까지에 해당한다. 태양 고도의 음영 한계각도(SH_c)는 SA_c 보다 더 낮은 태양 방위각에 대해 보정하여야 하는데, 이는 그림 6 의 적색 음영 곡선으로 나타난다. 일년 중 이 곡선이 태양 경로 차트와 겹치게 되면 음영이 일어나는데, 이는 하지와 동지와 경계를 접하고 있다. 이 사례에서, 동지와 교차하는 음영 특성(아래 부분, 내부와의 경계를 이루는 흑색선)은 모듈이 8:30 AM 에서 15:30 PM 까지는 항상 음영이 없다는 결과로 이어진다. 이는 이 시험을 위해 폐기되어야 할 데이터의 경계를 정의한다.

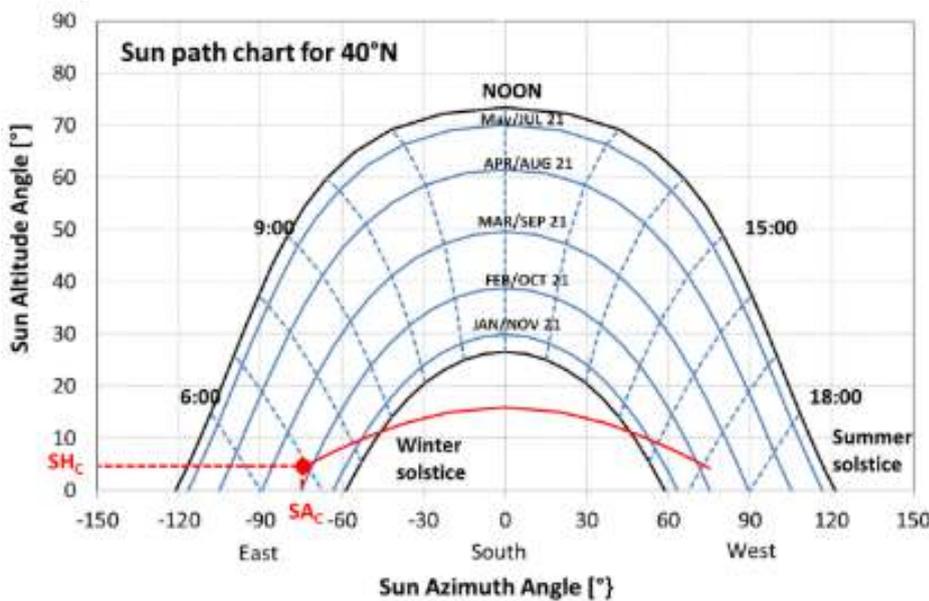


그림 6: 위도 40° N 위치에서의 태양 경로 차트의 사례. 적색 곡선은 위에 주어진 사례에 대한 음영 특성을 나타낸다.

4.1.4 알베도

모듈에 도달하는 총 태양 복사량(글로벌 복사량)은 직달, 확산 및 반사 복사량의 합이다. 경사면 위에 입사되는 확산 복사량은 천공 확산 복사량으로 정의하고, 반사 복사량은 지면과 같이 대기중의 경로에 있지 않는(non-atmospheric) 물체의 반사에 기인하는 것이다. 첫 번째 근사법으로, 확산 복사량은 반구(hemisphere) 안에 등방성 분포를 가지는 것으로 가정할 수 있다. 이 등방성 모델은 경사면에서의 확산 조사강도를 너무 낮게 잡는다. 보다 정확한 모델은 등방성, 태양주위를 도는 그리고 수평선 요소를 고려하는 것이다.

반사된 복사량은 주위(풍경, 작물재배, 빌딩 등)의 반사율에 의존한다. 각 표면은 알베도가 서로 다르기 때문에(광대역 반사율) 매우 불균일하다. 설문에 명시된 지면 유형은 알베도가 더 낮은 잔디부터 알베도가 높은 자갈, 시멘트, 금속 그리고 심한 경우에는 백색 페인트에 이르기까지 다양하다.

태양광모듈의 경사가 급할수록 모듈은 천공을 향하는 면적이 적어지고 반사된 복사량을 더 많이 받게 된다. 따라서 인접하는 지면의 알베도는 태양광모듈 시험 시설에서 매우 중요한 인자이다. 반사된 복사량에 의해 유발된 측정 오차를 최소화하기 위해서는 다음의 권장사항을 반드시 고려하여야 한다.

- 지면 알베도는 가급적 균일하여야 한다. 필요하다면 설치 랙 주위의 지면을 어두운 색의 자갈로 덮을 수 있다.
- 지면 위 태양광모듈의 설치 높이는 1 미터 이상이어야 한다.
- 여러 줄로 설치할 경우, 앞 줄과 뒤 줄 랙 위의 조사강도가 다르지 않도록 줄간의 거리는 충분히 유지하여야 한다.
- 반사도가 높은 표면(금속 부품, 수면 등)은 모두 제거하여야 하고 필요하다면 커버를 하거나 도색을 한다. 도색할 경우, 페인트 유형이 적외선 반사를 줄이지 않는지 유의하여야 한다.
- 양면형 모듈 같은 특별한 경우에는 지면의 뒤쪽 알베도 역시 균일하여야 한다. 조사강도 측정은, 경사각, 지면 위 높이 그리고 랙 위에서의 시료 위치에 따른 영향을 탐지할 수 있도록 모듈 후면의 여러 위치를 포함하여 양쪽 면 모두를 대상으로 할 것을 권장한다.

4.1.5 센서 위치지정

시험 어레이에 설치하는 센서 간의 거리는 설문 참여기관에 따라 차이가 심하였다. 면내 조사강도의 경우 거리는 2~35 미터, 풍속 측정의 거리는 0.5~150 미터이다. 위원회의 권장사항은 다음과 같다.

- 기상과 모듈온도 센서 설치의 규격 IEC 61853-2 와 IEC 61724-1 를 따른다.
- 규모가 큰 시험 시설 혹은 다양한 설치 랙을 사용한 경우는 여러 개의 조사강도 센서가 사용될 수 있다.
- 태양광모듈 성능측정의 비교를 위해서는 설치 랙의 여러 위치에서 측정된 일간 태양 복사량의 변화폭이 $\pm 1\%$ 를 초과하지 말아야 한다.

기상 센서에 대한 보다 상세한 내용은 4.3 장에 제공되어 있다.

4.2 전류와 전압 측정

4.2.1 하드웨어 해결책

모듈 출력 측정용으로 가용한 하드웨어 솔루션은 크게 3 개의 범주 - 최대 출력점 트래커(maximum power point trackers: MPPT), IV-트레이서(tracers)(IV) 혹은 IV-트레이서를 MPPT와 결합한(IV+MPPT) - 로 나눌 수 있다.

MPPT 범주는 마이크로 인버터를 토대로 한 모니터링을 포함하는데, 인버터 안에 있는 내부 센서의 정확도가 더 낮아 에너지수율 상호비교용으로는 충분하지 않다. 일부 경우는 측정에 의하기 보다는 색인표로부터 파라미터를 추론한다. 전류를 측정할 때 교정된 소형의 저항기를 직렬로 추가하면 바이어스 오차가 작은 정확한 모니터링이 가능해진다. 선택한 아날로그-디지털 변환기(analog-to-digital converter)는 가장 낮은 잡음과 가장 높은 정확도 그리고 시간과 온도에 따른 안정성이 있어야 한다. 개별 모듈에 최적화된 모니터링을 포함한 DC-to-DC MPPT도 있지만 가격이 비싸다.

두 번째 IV-트레이서 범주는 모듈 작동이 최대 출력점 주위에서 유지될 수 있게 크기를 맞춘 고정된(static) 혹은 수동 부하와 결합한 것이다. 수동 부하의 설치, 개방전압 혹은 단락전류 조건 하에서의 작동에 비해 보다 실제적인 모듈온도와 노화 영향을 야기한다[34].

모듈이 최대 출력점에서 작동하는 동안에 IV-트레이싱을 규칙적인 간격으로 수행하는 세 번째 범주가 과학계에서 가장 빈번하게 사용되고 있다.

그림 7은 설문조사의 결과로, 참여기관의 81%는 IV-트레이서를 MPPT와 결합하여 사용하고, 나머지는 IV-트레이서를 수동 부하와 결합하여 사용한다. 참여기관 대부분이 연구 지향적이기 때문에 MPPT 하나만 사용하지는 않는다는 점은 놀랍지 않은데, MPPT는 분석을 P_{max} 에 한정시키고 IV-곡선으로부터 추출할 수 있는 다른 파라미터의 분석은 허용하지 않는다.

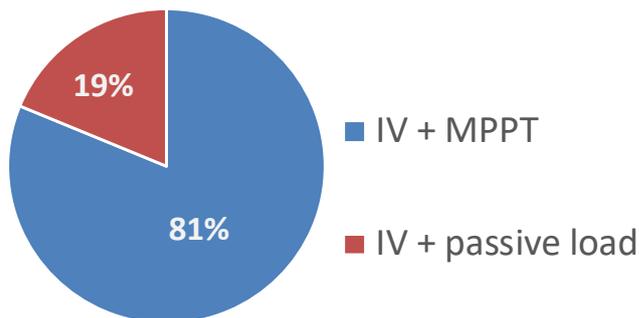


그림 7: 참여 시험기관들이 사용한 하드웨어 유형.

적절한 시험장비의 최종 선택은 수행하고자 하는 옥외시험의 범위에 크게 의존한다(2.1 장 참조).

표 1은 앞에서 기술한 3 가지 접근방법의 장점과 단점을 요약한 것이다.

표 1: 전류와 전압 측정 방법의 비교.

	(1) MPPT	(2) IV-트레이서	(3) IV-트레이서 + MPPT
설명	태양광모듈을 최대 출력점 (Pmax)에 유지.	적어도 개방회로부터 단락회로 방향으로(혹은 그 반대 방향) 전류를 측정한다.	(1)과 (2)의 내용 결합.
장점	어레이에서의 배치를 시뮬레이션. 정확한 에너지수율 측정 목적으로 출력생산을 적분할 수 있다. 더 낮은 비용.	I_{sc} (mismatch) 근처의 전류 스텝 혹은 V_{oc} 근처의 rollover 를 포함한 전체 IV 곡선 파라미터를 결정할 수 있다. 태양광모듈의 다른 특성을 결정하기 위해 $V < 0$ 와 $I < 0$ 같은 다른 사분면으로 확장할 수 있다. IV 스캔에서 에너지수율 계산에 필요한 모든 파라미터와 모든 태양광기술의 낮은 조사강도 거동과 열적 계수를 추출할 수 있다.	사용자는 대부분의 작동 시간에 대해 측정된 출력을 적분할 수 있고 그러면서도 IV 곡선 측정의 완전한 혜택을 얻는다. 사용자는 MPP 트래킹 방법별 영향을 볼 수 있고 MPP 트래킹, V_{oc} 혹은 I_{sc} 조건 사이의 영향을 검증할 수 있다.
단점	I_{sc} 와 V_{oc} 같은 IV 곡선의 다른 부분은 측정이 되지 않는다. 트래킹 효율에 의해 주어지는 추가 불확도를 유발한다.	스캔하지 않을 때 무엇을 할 지 결정해야 한다. 실시간 MPP 포인트들을 계산하고 이를 해당하는 실제 V_{mp} 조건에 넣을 때 요구되는 알고리즘. 소자가 I_{sc} , V_{oc} 상태로 있는지 혹은 바로 앞의 V_{mp} 가 태양광모듈의 열화 혹은 과도상태의 거동에 영향을 미치는지. ($V=0$ 혹은 $I=0$ 를 겪은 후에 일부 모듈은 거동이 달라질 수 있으며 서서히 정상으로 돌아온다). 과도상태는 에너지수율 계산에 영향을 줄 수 있다.	더 높은 비용.

설문조사는, 상업용 제품부터 맞춤 개발까지, 고비용부터 저비용 솔루션 그리고 일체형(all-in-one) 소자(MPPT, IV-트레이서 및 데이터 로거를 하나의 단일 기기로 통합)부터 자체 조립 시스템까지 다양한 범위를 강조하고 있다. 개별 모듈의 모니터링과 고정밀 최대 출력점 트래킹 목적의 하드웨어 소자를 생산하는 업체로 다음의 회사들이 있다: Daystar Inc., EKO Instruments, ET Instrumente, Gantner Instruments, Höcherl & Hackl GmbH, University of Ljubljana (LPVO-MS3X16), Papendorf Software Engineering GmbH, Pordis, Stratasense and SUPSI (MPPT3000).

이들 측정에 전자 부하와 결합하여 마이크로 인버터를 사용하는 다른 제조업체로는 FemtoGrid, PowerOne 및 Solaredge 가 있다. 위에 언급한 일부 제조업체는 스트링의 다른 모듈의 작동에는 영향을 미치지 않고 직렬 스트링 내에서 단일 모듈의 IV 곡선의 주기적 측정이 가능한 소자를 생산한다.

그림 8은 IV 측정과 최대 출력점 트래킹이 동일 기기 내에 통합된 사례 소자의 계통도이다. 각 모듈은 각기 시험 소자에 연결되어 있고 시험 소자들은 동기화가 가능하다.

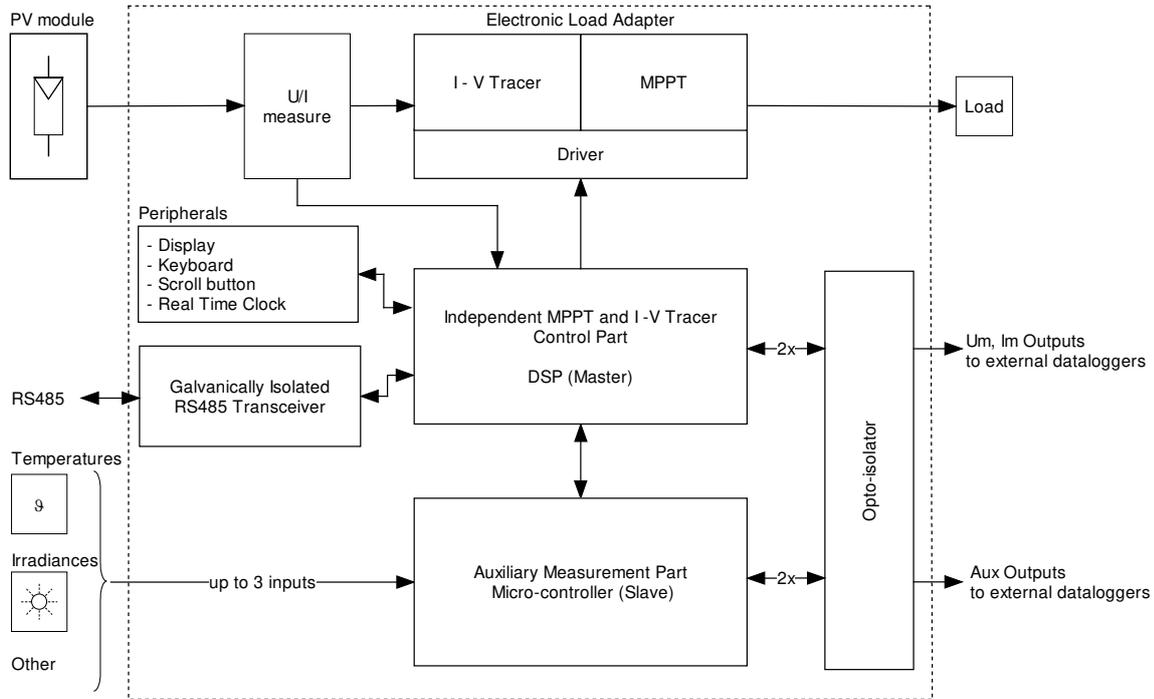


그림 8: SUPSI 에 설치된 올인원 하드웨어 솔루션의 사례 계통도.

다중화(multiplexing) 측정은 모듈의 누적 에너지 산출량뿐 아니라 완전한 IV 곡선도 확보할 수 있어 비용측면에서 효과적이고 유연한 방법이다. 일부 솔루션은, 예를 들어 IV-곡선 측정과 MPPT 혹은 수동 부하 사이를 전환할 수 있는 멀티플렉서와 결합이 될 수 있는 수많은 IV-트레이서를 제공한다. 그림 9는 네덜란드 Utrecht 대학에 있는 멀티플렉서 솔루션 사례로 MPPT 모듈과 결합된 24개 모듈로 구성된 어레이의 계통도를 보여주고 있다. 이 사례에서는, 각 모듈의 후면에 부착된 열전대용으로 추가 멀티플렉서가 사용되고 있다. 이 솔루션은 IV-트레이서와 부하 사이의 전환용으로 강력한 계전기(relay)를 필요로 하고 전환과 측정 시간 때문에 측정된 IV 데이터는 모든 모듈에서 동기화되지 않는다. 그러나 IV-트레이서가 자체 일사량계를 통해 조사강도도 측정할 수 있는 경우에는 각 IV-트레이서와 함께 동기화된 조사강도 데이터를 가질 수 있을 것이다.

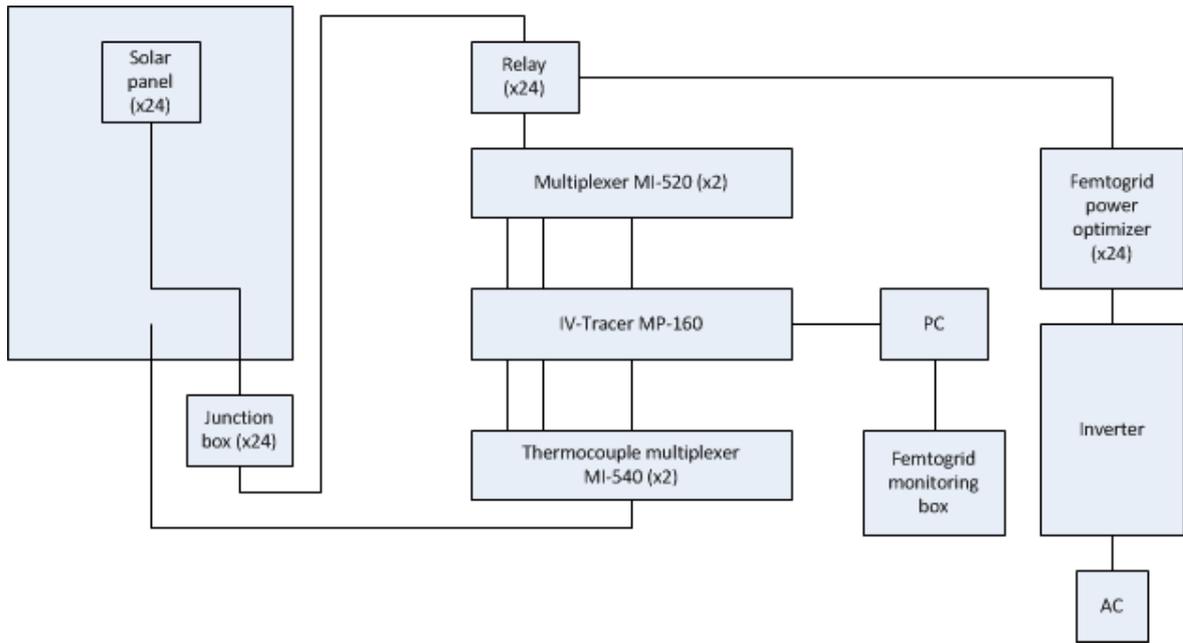


그림 9: 멀티플렉서 솔루션 사례의 계통도 (Utrecht University).

4.2.2 하드웨어 특성과 배치

새로운 옥외 시험설비를 선택하고 설계할 때는 기기의 불확도 외에 기타 특징들과 기술적 명세도 고려되어야 한다. 여기서는 통상적인 관행을 기술하고 권장사항을 소개하고자 한다.

하드웨어 정확도

규격 IEC 60904-1 에 따르면, 전압과 전류는 개방전압과 단락전류의 $\pm 0.2\%$ 의 정확도를 가진 기기를 사용하여 측정하여야 한다. 태양광시스템의 모니터링용 규격 IEC 61724-1 은 class A 측정(최고의 정확도) 목적으로 인버터 수준에서의 측정 불확도로 $\pm 2.0\%$ 를 규정하고 있다. 단일 모듈 특성분석용으로는 인버터에 의해 달성된 것보다 더 높은 정확도가 요구된다. 이 목적으로 설계된(4.2.1 참조) 최대 출력 트랙커는 충분히 이 요건을 만족한다.

그림 10 은 설문 응답자들이 사용한 MPPT 그리고/혹은 IV-곡선 트레이서의 측정 불확도를 요약한 것이다. I-V 측정의 불확도 $u[k=2]$ 는 풀 스케일에서 0.1~1.5 % 범위이다. 응답자의 절반은 측정 불확도가 0.2 % 이하라고 보고하였는데 이는 규격이 요구하는 한계이다. 응답자의 20 %는 MPPT 소자에 대한 불확도를 명시하지 않았다. 신고한 값의 스프레드는 부분적으로는 하드웨어 자체로 인한 것이지만, 불확도의 값이 서로 다르다고 명시한 때문이다.

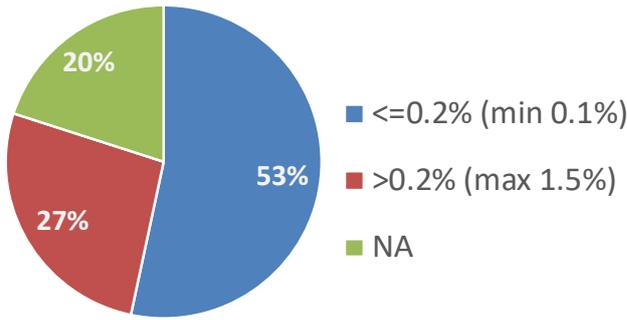


그림 10: IV 와 MPPT 측정 정확도 $u[k=2]$.

하나의 사례로, 실제 작동조건 하에서 전류와 전압 범위는 지속적으로 시험 중(자동 범위 조정) 조건에 적응된다. 대부분의 MPPT 소자들은 이 기능을 가지지만 모든 IV-트레이서의 경우에는 그렇지 않다. 이는 측정 정확도에 직접 영향을 미치는데 일부 불확도 요인들만 이를 감안한다.

그러나 하드웨어의 측정 불확도는 어떤 성능 지표의 총 불확도를 계산할 때 고려해야 할 여러 가지 기여요인 중의 하나이다. 다른 중요한 기여 요인으로는 IV-트레이서 구성, MPP 트래킹 정확도, 샘플링 빈도 및 데이터의 동기화가 있다.

IV 트레이서 특성

모듈의 IV 곡선을 추적할 수 있는 많은 솔루션들이 시장에 나와 있는데, 용량성 부하, 전자 부하, 양극성 출력증폭기, 4 단 전원공급장치 및 DC-DC 컨버터 등이 포함된다. 여러 가지 솔루션의 장단점을 기술한 개요는 문헌에서 찾을 수 있다[35].

설문조사에 응한 연구소들이 사용하고 있는 IV-트레이서의 61 %는 출력 측정에 초점을 두기 위해 1 사분면 ($I > 0, V > 0$)에 제한되어 있다. 그림 11 과 같이, 응답자의 11 %만이 4-사분면 측정 유닛을 시행하였다. 이들 유닛들은 값이 더 비싸고, 프로그램 가능하고 그리고 쌍방향 출력 공급을 기본으로 한 것이다. 참여기관들이 측정한 포인트의 개수는 최소 20 에서 최대 500 까지 범위로 선택한 하드웨어에 의존한다. IV 곡선의 최대 출력점은 P_{max} 근처 데이터의 다항식 피팅이나 혹은 다이오드 모델을 풀 곡선에 피팅하여 결정한다.

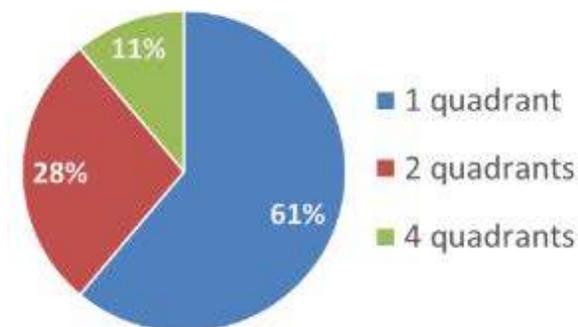


그림 11: IV-트레이서 사양서 (1, 2 또는 4 개 사분면 측정).

IV-곡선의 주사(sweep) 속도는 특별히 느리게 반응하는 태양광기술을 측정할 때[30] 혹은 급변하는 환경조건(부분적으로 흐린 날씨) 하에서 측정할 때 중대한 영향을 미친다. 그림 12 는 전형적인 주사 파라미터(방향과 속도)를 요약한 것이다.

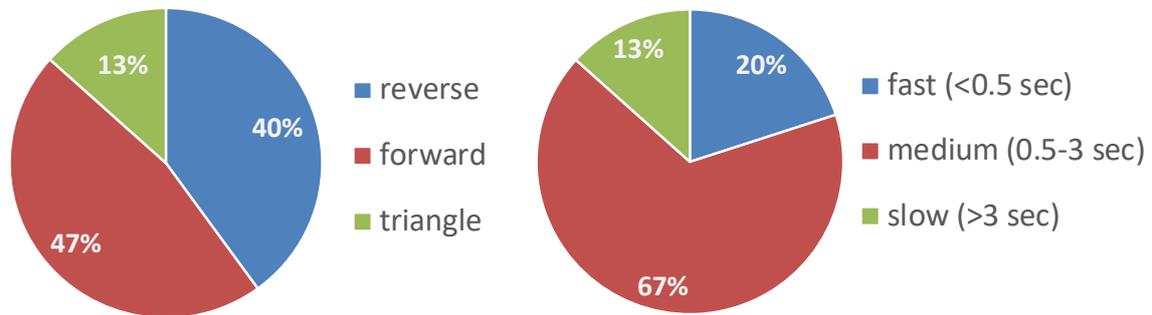


그림 12: IV-트레이서 명세서 (IV-곡선 스캔시의 주사속도와 방향).

응답자 기기의 67 %는 주사속도가 초당 0.5~3 범위로 이는 서서히 반응하는 태양광기술과 빠르게 변화하는 시험조건을 절충한 것이다. 기기의 13 %는 더 천천히(초당 3 회 이상) 측정하는데 조사강도 안정성과 각 개별 IV 곡선의 검토에 특별히 유의하여야 한다. 응답 기기의 20 %는 초당 0.5 회 이하의 빠른 주사속도를 가지는데, 용량성(capacitive) 모듈에서는 특히 역방향으로 주사할 경우 측정 오차의 위험이 증가할 수 있다. 47 %는 순방향으로 주사하여 IV-곡선을 구하고 용량성 모듈의 경우에는 대부분 그 주사속도를 맞춘다. 13 %는 삼각 펄스를 적용하는데, 이는 특별히 용량의 영향 혹은 조사강도 변화에 기인한 측정 상의 아티팩트를 확인하는데 쓰인다. 용량 효과에 의해 영향을 받는 대부분의 고효율 태양광기술의 경우, 순방향(I_{sc} 에서 V_{oc})과 역방향(V_{oc} 에서 I_{sc}) 주사로 측정된 IV-곡선이 중첩되는데, 이는 측정이 잘 이루어졌다는 지표이다.

MPPT 특성

MPPT 소자 트래킹 알고리즘은 정적(static)과 동적(dynamic) 둘 다 정확도가 다른데 이는 측정에 상당한 영향을 미친다. 정적 정확도는 안정한 조건 하에서의 트래킹을 기술하고, 반면에 동적 정확도는 다양한 조건(예: 빠른 구름의 이동) 하에서 최대 출력점을 찾는 MPPT의 능력을 기술한다. 정적 정확도 역시 태양광기술의 유형에 의존하는데 이는 데이터시트에 항상 명시되어 있지 않다. 예를 들어 충전율이 낮은 모듈의 경우에는 효과가 떨어진다.

설문조사에는 트래킹 정확도에 대한 정보가 일반적으로 결여되어 있는데 단지 3 기관만 값을 제공하였다. 정적 정확도는 99~99.5 % 이고 동적 정확도는 98~99 % 범위이다. 이들 값들은 측정하였거나 아니면 데이터시트 명세서로부터 가져온 것이다.

에너지수율 적분

모듈의 에너지수율은 MPPT 혹은 IV-트레이서로부터의 P_{max} 값들을 적분하여 계산한다. 그림 13 에서와 같이, 15 개 참여기관 중 9 개 기관은 기본적으로 MPPT 소자에 의존하고, 나머지 5 개 기관은 IV-트레이서에 의존한다. 일부는 데이터의 상호확인을 위해 둘 다 사용하는데, 이는 정적과 동적 트래킹 정확도의 확인도 가능하게 한다.

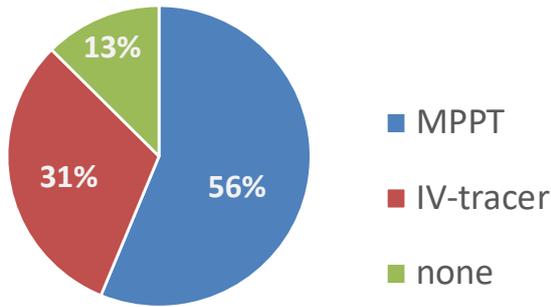


그림 13: 에너지수율 적산에 사용하는 하드웨어.

하지만 모든 참여기관들이 에너지수율을 측정하지는 않는다. 2 개(13 %) 시험소는 순간적으로 측정된 IV 곡선에만 초점을 두는데, 이는 (1) 성능 모델의 검증과 열화율의 모니터링, 혹은 (2) 특정 모델에서 모듈 파라미터 추출에 사용된다. MPPT 혹은 수동 부하는 IV-트레이스 사이에 모듈을 시험조건에 맞추는 용도로만 사용된다.

측정 동기화

전기적, 온도 및 조사강도 측정 채널의 동기화 수준은 모듈 측정의 최종 정확도에 크게 영향을 미치고 심지어는 전체 데이터 확보의 불확도를 지배할 수 있다. 벤치마킹 목적(kWh 상호비교)으로 모듈의 동기화 측정을 권유한다.

설문조사는 그림 14 에서와 같이 시험 소자의 약 절반이 동기화되어 있다는 것을 보여주고 있다. MPPT 의 15 %와 IV-트레이서의 27 %는 동기화되어 있지 않은데, 이 모든 기관들이 실제로 벤치마킹을 수행하지는 않는다. MPPT 의 31 %는 명시되어 있지 않다. IV-트레이서의 20 %는 비용 때문에 각 태양광모듈용으로 개별 IV-트레이서를 사용하지 않고 하나의 단일 IV-트레이서를 멀티플렉서에 연결하고 있는데 이는 본질적으로 동시 추적을 허용하지 않는다. 이런 절차에 의해 발생하는 오차는 반드시 반영하고 최종 불확도 분석에 포함시켜야 한다.

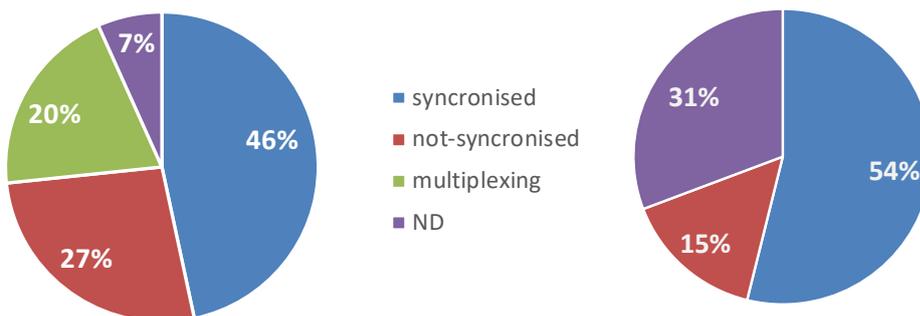


그림 14: 모듈 간의 동기화, (a) IV-트레이서 혹은 (b) MPPT.

모듈 사이의 동기화와 함께 모듈 데이터를 조사강도 데이터에 동기화하는 것 역시 매우 중요한데, 특히 데이터를 모델의 검증이나 모듈 파라미터를 추출하기 위해 사용할 때이다. 시그널 사이의 지체시간(delay)은 조사강도 센서의 반응 시간을 초과하여서는 안 된다.

그림 15 는 MPPT 의 54 %가 조사강도 측정과 동기화되어 있고, 38 %는 2~30 초의 지체시간을 가진다는 것을 보여준다.

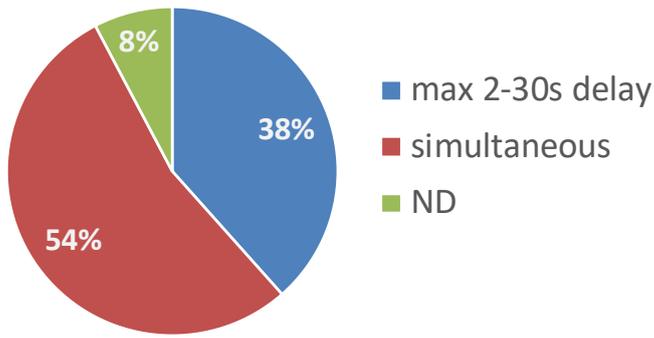


그림 4: 모듈의 전기적 측정과 조사강도 측정의 동기화.

그림 16 에서와 같이 IV 측정에는 시험소에 따라 접근방법이 다르다. 33 %는 IV-곡선 전과 후에 즉시 조사강도를 측정하는 방법을 따른다. 27 %는 IV-곡선 바로 전 혹은 후에 1 회 단일 조사강도 측정을 하고, 27 %는 전류와 전압과 동시에 조사강도를 측정한다.

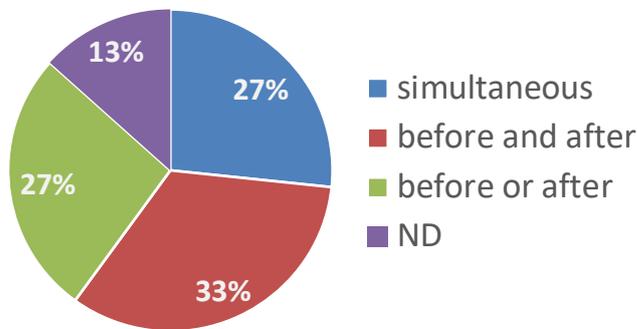


그림 16: 조사강도 측정을 단일 IV-곡선에 동기화할 때 사용하는 접근방법.

샘플링 빈도

데이터 동기화와 함께 샘플링 빈도 역시 모듈 측정에 큰 영향을 미친다.

시험소들이 적용하는 샘플링 빈도는 사용하는 하드웨어에 따라 약간씩 달라진다. MPPT 빈도는 0.1 초에서 최대 2 분까지의 범위이고, IV-트레이서는 더 늦어 1 분에서 15 분까지이다. MPPT 의 경우에는 평균 혹은 순간적 값이 저장된다. 1 분 이하의 더 높은 저장 빈도는 모듈의 동적 거동을 연구하는 사람들이 선호한다. 그리고 5 분 이상의 더 낮은 빈도는 에너지수율이 아닌 순간적인 IV-곡선에만 관심을 가진 사람들에게 한정된다.

환경 파라미터(조사강도와 온도)의 샘플링 빈도는 일반적으로 모듈 전류/전압 빈도와 같거나 더 높다. 이들 빈도는 분광 조사강도 데이터를 제외하고는 모든 파라미터에서 0.1 초에서 1 분 사이의 범위이다. 분광 조사강도는 일반적으로 더 낮은 30 초에서 15 분 사이의 빈도로 측정한다.

4.2.3 권장사항

아래 내용은 최대 출력점 트랙커나 혹은 IV-트레이서로 전류-전압 측정에서의 권장사항을 요약한 것이다.

일반적 권장사항

- 일반적인 측정 요건과 장비의 정확도는 규격 IEC 60904-1 와 IEC 61829 에 부합하여야 한다.
- IEC 61724-1 2017 은 태양광시스템용 주요 데이터 수집 요건을 포함하고 있는데 태양광모듈용 기준으로 사용되어야 한다.

측정 정확도

- 전류와 전압 데이터 수집 하드웨어의 불확도는 I_{dc} 0.05 %, V_{dc} 0.05 % 이하여야 한다.
- 교정된 모든 셉트 저항의 불확도는 0.1 % 이하여야 한다.

DC 부하

- 전류와 전압을, 빠른 안정시간을 갖고 신속하게 제어할 수 있는 DC 부하를 선택한다.
- 전용의 zero 전류, 전압 감지 접속도선을 사용한다 (4-선 연결).
- 하드웨어에 의해 유발되는 어떤 차이라도 제거할 수 있도록 태양광모듈 비교용으로 동일 메이커와 모델의 DC 부하를 사용한다.
- DC 부하는 온도의 변동과 그에 따른 측정 불확도를 제한하고 열적 이동(캐비닛 온도는 하루 중 $\Delta T = 30 K$)이 최소화될 수 있도록 일정한 온도 환경(예: 공조)에 있어야 한다.

IV 스캔 절차

- I_{sc} , R_{sc} , I_{mp} , V_{mp} , R_{oc} 및 V_{oc} 파라미터들은 불규칙한 곡선, 흠어짐, 혹은 단조롭지 않은(지속적으로 증가하거나 혹은 감소하지 않는) 거동과 같은 소자나 혹은 측정과 관련된 문제가 있는지 밝히기 위해 스캔한 IV-곡선으로부터 유도하여야 한다.
- 부분적으로 히스테리시스(hysteresis) 효과(IV 트레이서가 다르게 나타나는데 특히 V_{mp} 부근에서)를 최소화하기 위해 스캔 속도, 방향, 안정시간 및 해상도는 태양광기술에 따라 최적화되어야 한다.
- 구름의 변화로 야기되는 데이터의 흠어짐을 최소화하기 위해 스캔은 1~2 초 보다 길어서는 안 된다.
- 시스템은 조사강도를 천공 값보다 더 높게 증가시키는 구름이 질어지는 조건(즉, 태양 가까이에서 구름으로부터 반사) 동안에 측정이 가능하여야 한다. 심지어 북유럽 같이 덜 화창한 기후에서도 조사강도는 간단히 $1800W/m^2$ 피크에 달한다.
- IV 스캔과 MPP 트래킹 사이의 과도상태가 측정에 영향이 없도록 적절한 타이밍을 고려한다.
- IV 스캔 당 적어도 50 개 측정 포인트, 그리고 측정 포인트당 최소 10 샘플링 포인트가 있어야 한다.
- IV 곡선에서의 포인트 분포는, I_{sc} , P_{max} 및 V_{oc} 가까이에 포인트가 충분하도록 하기 위해 최적화할 수 있다. I_{sc} 가까이에 포인트가 매우 적으면 I_{sc} 피팅이 정확하지 않을 수 있다.
- 잔류 데이터를 검사하기 전에 데이터 포인트 사이의 내삽을 권장한다. 피팅 방법: 삼차 스플라인 피팅, 즉 다음에서 포인트 찾기
 I_{sc} 의 경우, $V < V_{oc}/10$: $V=0$ 에서의 교차점이 I_{sc} , 기울기는 $-1/R_{sc}$

P_{max} 의 경우, $V_{mp} * 0.45 < V < V_{mp} * 0.55$. V^* 의 최대값이 P_{max}
 V_{oc} 의 경우, $I < I_{sc} / 10$: $I = 0$ 와의 교차점이 V_{oc} , 기울기는 $-1/R_{oc}$.

- IV 스캔을 시작하기 전에 안정된 기상조건이 필요하다.

측정하지 않을 때의 모듈 바이어스

- IV-곡선 측정 동안을 제외하고 모듈은 항상 최대 출력점(MPP)에서 작동해야 한다. IV 곡선 측정 사이에 모듈을 I_{sc} 혹은 V_{oc} 에 두면 셀에서의 재결합으로 인한 추가 발생 열 때문에 모듈온도가 높아진다.
- 모듈 바이어스가 셀에 손상을 야기하고 열화율을 증가시킬 수 있기 때문에, 박막 소자에 대해서는 특별히 유의하여야 한다.

최대 출력점 트래킹

- 때때로 최대 출력점(MPP) 트래커가 모듈을 MPP 대신에 국부적인 최대점에서 작동시킬 수 있으므로 MPP 트래킹 알고리즘이 신속하고 정확한지 확인하여야 한다.
- MPPT의 정적 그리고 동적 트래킹 정확도(트래킹 효율)는 알고있어야 한다.
- MPPT 소자의 트래킹 알고리즘은 결과의 공정한 비교가 가능하도록 충전율(FF)과 무관하게 모든 태양광기술에 대해 최적화되어야 한다.
- 다양한 환경조건에서 다양한 태양광기술에 대해 IV-데이터와 함께 MPPT 데이터의 체계적인 상호 확인을 권장한다.

데이터 샘플링과 동기화

- 많은 멀티플렉서 제품들은 믿을 수 없으므로, 없애거나 아니면 고품질 제품만 사용한다.
- 모든 태양광모듈의 IV 스캔을 동기화한다.
- IV 스캔에서 권장하는 간격은 1 분이지만 시험의 범주에 따라 바꿀 수 있다.
- 샘플링 빈도 목표 1~5 분을 평균으로 하되 환경 파라미터의 데이터 수집율은 1-10 Hz의 범위에 있어야 한다.
- IV 스캔에서의 측정 포인트 샘플링 빈도 목표를 평균으로 하되, IV 스캔 파라미터의 데이터 수집율은 1000Hz 보다 커야 한다.
- 환경 파라미터(평균 값)의 데이터 수집율은 IV 스캔과 동기화되어야 한다.
- 추적 동안 조사강도 안정성을 확보하기 위해 IV 트레이스 전과 후에 조사강도를 측정하는 것이 최선이다. I_{sc} 에서 I_{mp} 까지 전류의 흠어짐 조사는 조사강도의 변동을 나타낼 수 있지만, 이는 덜 직접적인 방법이다.

섀트(Shunts)

- 외부 섀트가 필요할 때 그 범위는 1~10 mΩ 사이이다. 섀트는 교정 인증서가 있어야 하고 열적 이동 특성이 낮아야 한다.
- 교정된 섀트 저항 불확도는 0.01 %에 달할 수 있고, 온도계수는 ± 5 ppm/K (20~60°C) 이하여야 한다.

케이블

- 4-선 연결이 되어야 하는데 2-선은 모듈 출력과 전류 측정용, 다른 2-선은 zero-current 전압 측정용이다.
- 거리 20 미터 이상의 경우에 전선은 단면적이 적어도 6 mm²가 되어야 한다. 거리가 20 미터 이하인 경우 전압 강하가 크지 않다면 4 mm²로 충분하다.

- 4-선 연결이 아니면, 케이블 길이를 최소화하여야 하고, 전압 강하의 특징을 확인하여야 한다.

커넥터

- 접촉저항의 큰 변화 없이 옥외 조건과 반복되는 재연결에 견디기 위해서는 태양광모듈용 표준 커넥터(예: MC4)를 사용하여야 한다.
- 태양광모듈 커넥터를 4-선 배치형태로 나누는 데는 Y-커넥터를 사용한다.
- 부식, 먼지 등에 의해 시간에 따라 변할 수 있으므로, 연장 케이블의 연결 저항은 주기적으로 확인한다.

퓨즈와 과전압 보호

- 퓨즈와 과전압 보호는 불확도를 유발할 수 있으므로 최적의 성능 측정을 위해서는 보호 소자를 사용하지 않거나 혹은 시그널에 미치는 영향이 최소가 되도록 설계한다.

확인과 검증

- 단락전류 조건에서 전압 강하를 정량화하고 측정값과 모듈의 참 값 I_{sc} 사이의 차이를 계산한다.
- 개방전압 조건에서 어떤 전류 흐름을 정량화하고 측정값과 모듈의 참 값 V_{oc} 사이의 차이를 계산한다.

교정

- 일반 사항: 표류나 바이어스를 피하기 위해서는 기준 측정에 대한 규칙적인 교정이 필요하다.
- 제조업체 사양에 따라 측정 장비를 교정한다.
- 적어도 2 년 마다 교정하고 표류와 바이어스를 분기별로 추적한다.

4.3 환경 파라미터의 측정

4.3.1 면내 조사강도

조사강도는 태양광모듈로 투입되는 태양에너지로, 그 중요성은 전기 에너지 산출량 측정만큼 중요하다. 그러나 조사강도는 정확하고 일관된 측정이 훨씬 더 어려워 잘 조화된 측정 절차와 가능한 최고의 기기 사용을 필요로 한다.

태양광모듈의 전체적인 효율과 모듈 성능비(MPR)를 평가하기 위해서는 모듈의 면내로 들어오는 글로벌 조사강도를 측정하는 것이 필요하다. 일반적으로 이런 측정은 풀 스펙트럼 범위에 감응하는 일사량계를 이용하거나 분광 선택성의 기준 셀을 사용한다. 그림 17 에서와 같이, 조사된 대부분의 시험설비는 두 가지 유형의 조사강도 센서를 모두 구비하고 있다. 일반적으로 면내 조사강도 (G_i)는 최소 2 개의 일사량계와 분광응답이 다른 1 개 이상의 기준 셀로 측정한다. 후자는 시험 모듈의 분광응답과 유사해야 한다. 일사량계는 들어오는 광대역 조사강도 (H)의 계산을 위한 기본적인 선택이고, 기준 셀은 STC 조건에 대한 보정이나 혹은 다른 데이터 분석 목적으로 사용된다.

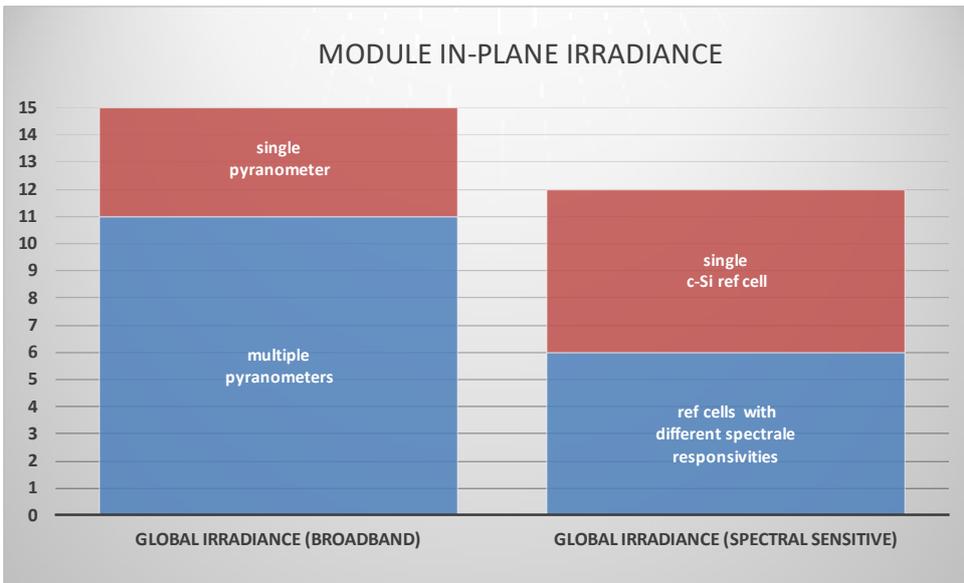


그림 5: 조사된 시험 사이트에서 시행한 어레이면에서의 글로벌 조사강도 측정 유형.

이 목적에 가용한 상업용 일사량계는 광범위한 태양광 스펙트럼을 흡수하기 위해 흑색 표면(black surface)을 사용한다. 이 흑색 표면은 대류 냉각과 넓은 태양 입사각 범위에 걸친 반사손실을 최소화하기 위해 유리로 된 돔 아래에 장착되어 있다. 이 용도로는 가장 최고 등급의 (ISO-9060 분류에서 "2 차 표준(secondary standard)") 기기만 사용되어야 한다. 왜냐하면 품질이 더 낮은 기기들은 작동 환경에서 주위와 천공 온도 등의 이차 인자들에 의해 더 크게 영향을 받기 때문이다[36]. 이차 표준 기기들은 더 안정성이 있고, 조사강도의 변화에 태양광모듈이나 기준 셀의 거의 순간적인 응답만큼 빠르지는 않지만 수 초 정도 내에서 빠르게 반응한다

고품질의 일사량계 사용과 함께 단락전류(온도 보정한)에 비례하는 시그널을 제공하는 태양광 기준 셀로 면내 조사강도를 측정할 것을 권장한다. 이 측정을 흔히 유효 조사강도라고 칭한다[37]. 입사 조사강도가 AM1.5G 스펙트럼과 일치하고 받는 면에 법선 방향일 때, 광대역과 유효 조사강도 값은 모두 1000 W/m^2 이다. 이상적인 일사량계는 하나만 정의할 수 있지만 이상적인 기준 셀은 매 태양광모듈마다 다른데, 기준 셀은 평가대상인 태양광모듈과 같은 각도와 분광응답을 가져야 한다. 평가대상 모듈과 유사한 각도와 분광응답을 가진 기준 셀을 이용하면 효율 방정식으로부터 이들 2 가지 인자를 제거할 수 있고, 낮은 조사강도 성능과 준안정성 혹은 열화에 대한 보다 정확한 수치를 제공한다. 유사한 응답은 동일 유형의 셀을 사용하거나 혹은 다른 유형의 기준 셀에 하나의 필터 유리를 추가하여 얻을 수 있다. 이것의 가장 흔한 예가 비정질실리콘(a-Si) 모듈의 분광응답을 근사하기 위해 사용하는 KG3 혹은 KG5 필터를 가진 c-Si 셀이다. 최근 KG1 필터를 가진 c-Si 셀이 CdTe 모듈과 잘 일치하는 것으로 밝혀졌다[38]. 필터를 사용한 기준 셀 방법의 장점은 일부 다른 태양광기술보다 더 안정하다는 점이다. 실제로 매우 한정된 수의 기준 셀을 설치하고 유지하기 때문에 각도와 분광응답에서 약간의 불일치는 항상 있게 된다. 만약 필요하다면, 각도 불일치는 기준 셀과 모듈의 각도 응답 곡선을 토대로 정량화할 수 있고, DNI 측정과 조합하여 보정될 수 있다. 마찬가지로 분광 불일치는 분광응답 곡선을 토대로 정량화할 수 있고 분광 조사강도 측정과 조합하여 보정할 수 있다(7.1.3 절 참조).

기준 셀의 단락전류는 온도와 함께 증가하는데, 그 인자는 무시하기에는 너무 커서 c-Si의 경우 $^{\circ}\text{C}$ 당 0.05 % 정도이다. 이런 이유로 셀은 그 온도를 측정할 수 있는 방법을 구비해야 하고, 측정 시스템은 이 온도를 토대로 보정을 해야 한다. 온도가 높아지면 셀 소재의 밴드갭이 감소하는데,

이것이 적외선 영역에서의 분광응답을 증가시킨다. 단락전류의 온도계수는 주로 이 분광응답의 변화에 분광 조사강도를 곱한 값에 의해 결정되므로 옥내와 옥외에서 온도계수가 다른 것을 관찰하게 된다. 온도계수의 불확도 때문에 온도 보정 기준 셀의 판독에 대한 불확도는 작동온도가 교정 온도로부터 멀어질수록 더 커진다[39].

기준 셀의 응답시간은 열적으로 응답하는 일사량계보다 더 빠르다. 후자는 조사강도 값의 갑작스런 변화의 95 %까지 도달하는데 3~5 초를 필요로 하나 기준 셀은 거의 순간적으로 응답한다. 응답이 느리다고 반드시 측정 오차로 이어지는 것은 아니고, 실제로 빨리 응답하는 기준 셀은 정확한 적분값을 계산하기 위해 더 빈번하게 판독해야 하므로 이것을 하나의 장점으로 고려할 수도 있다[40]. 현대의 데이터 수집 장비는 용이하게 1 초당 하나의 시료를 측정할 수 있는데, 이는 모든 조사강도 측정 기기의 최저한도이다. 빨리 응답하는 기기는 안정된 조사강도 조건을 탐지하는데 매우 유용한데, 이는 정확한 IV-곡선 측정시 필요하다. 이런 기기를 사용한 측정은 IV-곡선 전과 후에 할 수 있고[25] 혹은 조사강도를 IV-포인트마다 측정할 수도 있다.

데이터를 수집하고 그리고 응답시간, 온도 의존성, 방향 응답과 많은 다른 조사강도 센서의 특성을 정량화하는 방법을 개선하는 것이 PVSENSOR 프로젝트의 목표이다[36]. 많은 특성들이 체계적인 오차를 만들어 내는데, 보정 방법을 개발하고 사이트에 고유한 측정 불확도에 대한 보다 정교한 평가를 지원하는데 이런 오차들에 대한 지식을 사용할 수 있다. 이 주제에 대한 추가 정보는 IEA "태양광시스템 수율 예측에서의 불확도에 관한 보고서(Report on uncertainties in PV System Yield Predictions)에서 찾을 수 있다[41].

글로벌 광대역 조사강도의 측정 불확도와 관련한 15 참여기관의 신고 수치는, 표준 서모파일 일사량계의 경우는 1.3~2.5 %, 그리고 글로벌과 확산 서모파일 센서와 조합하여 SPN1 을 사용한 기관은 5~8 %이었다. 분광 기준 셀로 측정한 글로벌 조사강도의 신고 불확도는 1.8~5.0 %이었다.

경사진 모듈이 받는 전체 조사강도는 비록 단일 양(quantity) (G_i) 이지만 확산의 양 ($G_{i,d}$) 과 직달의 양 ($G_{i,b}$) 을 구분하는 것이 매우 유용하다. 이들 2 가지 조사강도 구성성분의 분광 구성과 입사각은 서로 다르므로 이들은 전체 수율에 미치는 영향이 다르다. 법선면 직달 조사강도 (DNI) 는 최고 등급의 일사량계와 자동 트랙커를 사용하여 측정하여야 한다. 이를 입사각의 코사인으로 곱하면 면에서의 직달 조사강도 ($G_{i,b}$) 가 된다. 모듈의 기울기와 방향 둘 다는 이 계산을 위해 정확하게 결정되어야 한다. $G_{i,d}$ 를 측정하는 방법의 대안으로 G_i 값으로부터 $G_{i,d}$ 값을 빼서 $G_{i,b}$ 를 결정하는 것은 항상 권장하지 않는데, 왜냐하면 $G_{i,d}$ 는 경사진 면에서 정확하게 측정하는 것이 더 어렵기 때문이다.

확산 조사강도 측정에는 일사량계와 직달 조사강도를 막을 수 있는 차광 도구가 필요하다. 최고의 차광 도구는 디스크나 공 모양으로 된 것인데, 차광용 공이 있는 상업용 2-축 트랙커는 천공(sky)을 막지는 않지만 경사가 없는 수평면의 확산 조사강도 측정용으로 설계된 것이다. 그럼에도 불구하고, 경사진 기기를 가리기 위해 만약 이런 트랙커를 사용하거나 혹은 주문 제작한다면, 이는 면내 확산 조사강도 $G_{i,d}$ 를 결정하는 최선의 솔루션이다. 다른 가용한 상업용 솔루션은 차광 밴드나 혹은 링을 사용하는 것이지만, 이는 링에 의해 가려진 천공의 과외 부분(경사진 경우에는 지면 역시)을 감안하기 위해 보정을 하여야 하므로 추가적인 불확도를 초래한다. 이들 보정 인자들은 수평면 측정용으로 개발되어 검증을 받았는데, 경사진 경우의 보정에 이들을 사용하는 것은 권장하지 않는다[42].

어려움 때문에 조사 대상기관의 소수만이 어레이면에서의 확산 조사강도를 측정한다. 좀 더 흔하게는 확산 조사강도를 차광용 링으로 혹은 통합형 확산 조사강도 측정 도구가 있는 복사계(SPN1 유형)로 측정한다. 그림 18 은 측정된 다른 조사강도 파라미터를 보여준다. 대부분의 시험기관은 수평면에서의 확산 조사강도(DHI)를 측정한다. 9 개 시험기관은 2-축 트랙커에 설치된 직달 일사량계로 법선면 직달 조사강도(DNI)를 측정하고 그리고 거의 모든 기관은 글로벌 수평면 조사강도를 측정하는데, 이는 태양광 수율 시뮬레이션에 필요한 기본적인 입력 자료의 하나이기 때문이다.

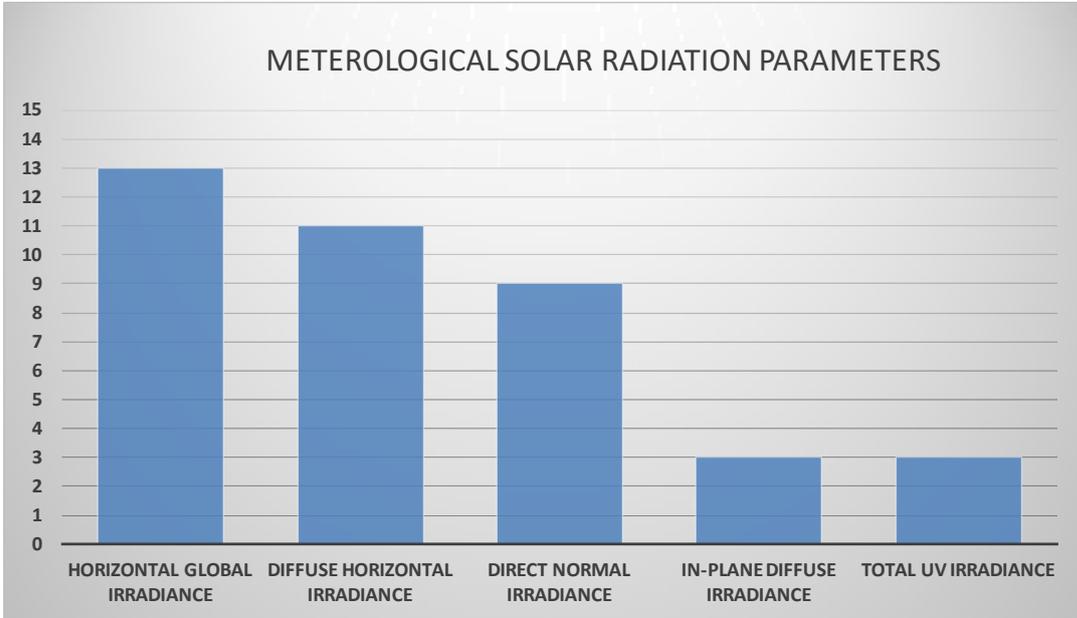


그림 6: 15 개 시험기관에서 이행한 조사강도 측정의 유형과 분포.

글로벌 수평면과 확산 조사강도의 측정은 경사진 모듈의 수율을 평가하는데 직접적으로 유용한 것은 아니지만, 전위 모델을 사용함으로써 면내 조사강도를 추정할 수 있고 그리고 데이터 일관성을 확인하는데 사용할 수 있다. 파라미터 측정용으로 정확도가 더 낮은 기기도 훨씬 더 낮은 비용으로 중복 측정을 제공함으로써 목적에 기여할 수 있다.

직접적으로 모듈 성능 계산에 들어가지 않는 2 개의 추가적인 조사강도 측정 옵션이 있다. 첫 번째는 3000~4000 nm 이상의 중간 적외(mid-infrared) 복사량이다. 야간 복사계(pyrgometer)로 측정하는 중간 적외선 조사강도는 일사량계 판독에서의 열 오프셋 오차를 보정하여 측정 불확도를 낮추는데 사용할 수 있다. 이 측정은 셀/모듈 작동온도 연구에도 유용하다. 두 번째 옵션은 280~315 nm (UVB) 그리고/혹은 315~400 nm (UVA) 범위의 자외 조사강도이다. 이 조사강도의 대부분 또는 모두는 양질의 일사량계 범위 내에 있으므로 가용한 에너지는 이미 광대역 조사강도에 포함되어 있다. 태양광모듈에 의해 전기로 변환되는 부분은 거의 없는데, 유리와 EVA 에서의 흡수율이 높고 그리고 이 파장 범위에서의 양자효율은 매우 낮기 때문이다. 그러나 자외선 복사량이 야기할 수 있는 소재 변화 때문에 장기 연구에 매우 유용할 수 있다.

높은 정확도의 조사강도 측정에는 최고의 기기가 필수적이지만, 높은 정확도의 목표는 적절한 설치 및 유지관리에 의해서만 성취할 수 있다. 모범 사례는 여러 문헌에 기술되어 있다[40,43,44]. 태양광 성능측정에 적절한 일부 핵심사항은 다음과 같다.

- 일사량계와 기준 셀 기울기/경사와 방향은 미소한 차이 내에서 시험 모듈의 것과 일치해야 한다.
- 경사진 기기는 대략 모듈과 같은 양의 지면 반사 복사량을 받아야 한다. 이는 보통 이들을 아주 가깝게 같은 높이에 설치함으로써 가능하다.
- 이슬, 서리 혹은 적설의 위험이 있고 그리고 이런 조건에서의 데이터를 평가해야 할 필요가 있으면 환기기설 그리고/혹은 저 전력 히터가 있는 기기를 사용한다. 통풍장치는 또한 여러 가지 오차와 불확도 요인의 하나인 열 오프셋을 줄이는데 도움이 될 수 있다.
- 센서의 광학 부품은 지역의 조건과 시험 일정에 맞추어 깨끗이 닦고 규칙적으로 검사해야 한다. 일부 기기에서는 흡습제도 확인하고, 기기 내에서 응축이 생기지 않도록 주기적으로 교체한다.
- 교정은 규칙적으로 확인해야 한다. 가능하다면 계획을 세워서 여러 기기들을 상호 확인하고 번갈아 가면서 외부 교정 기관에 보내도록 한다.

참고문헌에 있는 많은 모범 사례는 지속적인 작동을 지향하고 그리고 특별한 성능시험의 기간과 조건에 맞게 조정 한다. 다음 2 개의 표는 조사강도 파라미터와 그 대체 측정 방안을 요약한 것이다.

표 2: 필요한 측정.

	위치	선호(Preferred)	대안(Alternate)
G_i 면내 조사강도 in-plane irradiance	경사진 Tilted	이차 표준 일사량계	
G_{eff} 분광 감응 유효 조사강도 spectrally sensitive 'effective' irradiance	Tilted	기준 셀	
$G_{i,b}$ 면내 직달 조사강도 in-plane direct beam irradiance	Tilted	$DNI * \cos(\theta)$	
$G_{i,d}$ 면내 확산 조사강도 in-plane diffuse irradiance	Tilted	차광용 볼을 가진 열 오프셋이 적은 이차 표준 일사량계	$G_i - G_{i,b}$
DNI 법선면 직달 조사강도 direct normal irradiance	트래킹 Tracking	최고 등급의 직달 일사량계와 자동 트래커	

표 3: 데이터의 일관성 확인을 지원하는 추가적인 측정.

	위치	선호(Preferred)	대안(Alternate)
GHI 글로벌 수평면 조사강도 global horizontal irradiance	수평 Horizontal	이차 표준 일사량계	비 이차 표준 일사량계
			SPN1
DHI 수평면 확산 조사강도 diffuse horizontal irradiance	Horizontal	차광용 볼을 가진 열 오프셋이 적은 이차 표준 일사량계	차광용 링을 가진 일사량계
			SPN1

4.3.2 모듈온도

STC 온도 25°C 이상으로 모듈온도가 증가하면 거의 예외 없이 모듈의 효율이 감소하는데, 이것이 에너지 손실의 가장 큰 이차 인자이다(일차 인자는 조사강도와 음영). 이처럼 모듈온도의 정확한 결정은 이상적인 시스템과 비교하여 손실 요인을 적절히 확인하고, 모듈온도 계수를 결정하는데 중요하다.

모듈온도는 모듈 구조(예: 유리-유리 모듈은 유리-백시트 모듈과 온도 프로파일 다르다)뿐 아니라 조사강도, 바람에 노출[45], 작동 방법(예: MPP 대 V_{oc}), 설치대 구조 같은 다양한 인자들에 의해 영향을 받는다[46].

일반적으로 옥외 모듈온도 결정은 접촉 측정 방법(모듈에 온도 센서 부착) 및 비접촉 방법(통상 IR 서모그래픽 카메라를 사용)을 사용하거나 혹은 V_{oc} 와 모듈온도 사이의 관계식과 같은 프록시 측정을 사용하는 잘 알려진 모델 관계식을 통해 이루어진다. 이 방법들의 상호 비교는 표 4 와 같다. 접촉 온도 측정방법이 모듈 출력과 에너지 결정에 관련되는 IEC 규격에서 가장 널리 사용되는데, 이는 비교적 간단하고 비용효과적이기 때문이다. .

접촉 온도 측정방법은 모듈이 대상 표면과 물리적으로 접촉하는 하나의 센서를 필요로 한다. 일반적으로 이 방법에서 센서는 모듈의 뒷면(백시트 혹은 유리)에 부착하는데, 연구 목적으로 주문 제작한 모듈에서는 온도 센서를 셀의 뒷면에 라미네이션한 상태에서 측정할 수도 있다. 가장 널리 사용되는 온도 센서는 Pt100 RTD 와 열전대인데[47], 비슷한 정확도를 가지면서 비용을 낮추기 위해 디지털 접촉 센서 같은 대체 방법을 사용할 수도 있다[48,49]. 일반적으로 Pt100 센서는 불확도가 가장 낮고(비용이 더 높음), 4-선 연결을 사용하여 최선의 결과를 얻을 수 있다. 열전대는 통상적으로 케이블이 더 얇고(설치에 더 용이할 수도), 센서 자체가 Pt100 센서보다 더 싸지만, 이들은 냉접점(cold junction)을 필요로 한다. 냉접점 사용에 따른 불확도는 전체 측정 불확도에 직접적으로 추가되는데, 불확도가 낮은 냉접점은 크기가 더 크거나 비싸다. 디지털 센서 혹은 다른 원리(예: NTC 센서)를 이용한 센서들도 비용은 더 낮으나 그 불확도와 소급성(traceability)이 아직 Pt100 이나 열전대 센서의 수준에는 미치지 못하고 있다. .

대부분의 접촉 온도측정은 에폭시 접착제나[47] 혹은 테이프[50], 가끔은 열전도성 페이스트를 사용하여 백시트 ¹ 위에 부착한다. 여기서의 관심은 셀 온도이므로 백시트 측정 온도에 대한 보정이 필요하다. 가장 광범위하게 사용되는 백시트-셀 온도 보정은 다음 방정식으로 주어진다[46].

$$T_c = T_{BS} + \Delta T_{CBS} * \frac{G_i}{G_{STC}}$$

여기서 T_c 는 셀 온도, T_{BS} 는 백시트 온도, ΔT_{CBS} 는 STC 조건에서 셀과 백시트 사이의 온도 차이, G_i 는 면내 조사강도이다. 접촉 센서용으로 사용된 접착제의 양이 측정값에 예상치 못한 시차를 불러올 수 있고[50], 그리고 열 페이스트를 사용할지 절연은 어느 정도 사용되어야 하는지 등 부착 방법의 선택에 주의를 하여야 한다.

¹ 여기서 백시트는 태양광모듈의 뒷면을 의미하는 포괄적 용어임.

개방전압의 측정은 프록시 혹은 간접 방법의 사례에 해당하는데, 여기서는 대상(셀 온도)의 양(quantity)에 잘 알려진 관계식을 가진 다른 변수들이 측정된다. 이 방법은 옥내 조건(그리고 처음에는 단일 셀에 대해)부터 옥외 조건과 모듈에 채택되었고, 대상 모듈은 균질한 표면온도를 가진다고 가정한다. 하지만 바람의 조건과 설치 장착 방법이 모듈을 가로 지르는 방향의 온도 분포에 영향을 미치므로 항상 그런 것은 아니다[23,24]. 등가 셀 온도(equivalent cell temperature: ECT, IEC 60904-에 상세히 기술)는 전압으로부터 온도를 끌어내는 one-diode 모델을 사용하고 모듈의 개방전압과 어레이면의 조사강도를 측정하여 얻을 수 있다. 모델의 교정은 접촉 온도 측정과 조사강도를 달리한 측정을 요구하는데, 이것이 최종 결과값의 정확도에 영향을 미친다. Two-diode 온도 모델도 사용되지만, one-diode 모델에 비해 매우 복잡하다.

IR 서모그래피 카메라를 사용할 때 다른 유형의 복잡성이 나타나는데, 왜냐하면 그 이미지가 모듈 표면으로부터 방출되는 적외 복사를 나타내기 때문에 오퍼레이터의 역할과 훈련[51]부터 카메라 품질뿐 아니라 표준 배경 설정까지 여러 인자들이 중요해진다. IR 서모그래피 카메라는 급격히 개량되고 있지만(그리고 비용은 낮아지고 있음), 이 방법들은 오퍼레이터가 접촉 혹은 V_{oc} 방법에 비근한 결과를 얻을 수 있을 때까지, 특히 얻고자 하는 값이 절대 모듈온도라면 실질적인 훈련을 필요로 한다. 다른 한편으로, IR 카메라는 현장에서 빠르게 활용할 수 있으며 온도 차이를 쉽게 관찰할 수 있게 해준다. 이런 이유로, IR 카메라는 접촉 온도 센서의 위치가 바른지 검증하고, 모듈의 온도 프로필이 균질(예: V_{oc} 방법이 적용될 수 있는지 확인하기 위해)한지 확인하는데 흔히 사용된다. IR 카메라는 모듈 표면으로부터 방출되는 적외 복사에 의존하므로, 최선의 결과는 더 높은 조사강도에서 얻어지는데, 이는 열점 같은 문제들이 보다 쉽게 확인될 수 있도록 해준다[51,52]. 바꿔 말하면, 온도 차이는 조사강도가 더 낮을수록 확인이 더 어렵고 불확도가 더 높아진다.

장기 옥외 에너지수율 측정에서는, 예로부터 접촉 방법을 선호하였다. 최선의 결과를 보장하기 위해서는 그 결과를 적어도 다른 방법과 결합하고, 규칙적인 간격으로 결과를 상호 검증할 것을 권장한다. 설문조사에서는, 시험 사이트의 다수(15 개중 8 개)가 테이프와 전도성 페이스트나 접착제를 사용하여 모듈에 단일 센서를 부착한다는 것을 보여주었다. 4 개의 기관은 비균일성 혹은 중복 확인에 대한 정보를 얻기 위해 센서의 개수를 2~4 개로 증가시킨다. 명시된 측정 정확도는 모두 같거나 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하이다.

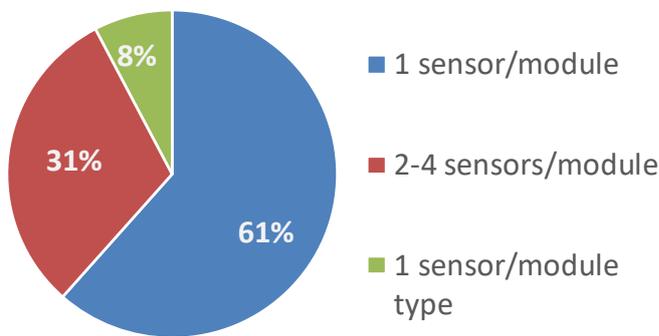


그림 7: 모듈 후면에 부착한 온도 센서의 개수.

표 4: 모듈온도용 주요 측정 방법의 비교.

	접촉 방법 Contact methods	V _{oc} 방법	IR 방법
옥외 측정 조건에 적용 가능	조사강도 범위에서 가장 낮은 불확도 변화 ²	안정된 기상조건에서 최선, 조사강도 낮으면 불확도 증가	조사강도 $G > 600 \text{ W/m}^2$ 권장 [52,53] 조사강도 낮으면 불확도 증가
규격	IEC standards: 61215, 61829, 60904-5, 61724, 60891, 61853-1 에 포함	IEC 60904-5 에 포함	규격화 예상 (IEC 62446- 3)
작동 조건	모듈은 어떤 작동점에도 있을 수 있다.	시험 모듈은(잠정적으로) V _{oc} 에, 나머지 시간에는 MPP, V _{oc} , I _{sc}	모듈은 어떤 작동점에도 있을 수 있음
제 시간 측정	연속 측정 가능(시계열 분석용으로 사용 가능)	연속 측정(모듈은 V _{oc} 에 유지되어 온도가 더 높음)용 전용 모듈이나 V _{oc} 의 불연속 측정(예: 규칙적 간격으로 측정된 IV-곡선으로부터 V _{oc}) 중에 필요	통상적으로 스냅샷 측정; 오퍼레이터의 연속적 개입 없이 적외 센서를 사용하여 반복 측정 가능
측정이 커버하는 면적	포인트 기반 측정 (하나 이상의 셀)	모듈에서 셀의 평균온도	풀 모듈, 이미지나 혹은 센서 뷰의 평균화 없음
해상도	< 0.01 °C	< 0.01 °C	0.01 °C 까지, 공간 해상도는 IR 카메라에 의해 결정: 커버된 면적에 대한 픽셀의 개수
불확도 (k=1)	센서만 0.1~0.25 °C, 판독 장비가 0.01~0.2 °C 추가 가능, 설치 장착 방법과 기준 접합(열전대용)으로 인해 더 많이 추가	모듈에 대해 교정이 잘 되었으면 0.1~0.6 °C, 접촉 측정과 사용된 모델 ³ 의 불확도에 의존	0.1~1.0 °C, 품질(그리고 서모그래픽 카메라의 비용)에 의존

² The 접촉 센서의 불확도는 측정된 온도의 함수이지만, 이 불확도의 크기는 V_{oc} 혹은 IR 방법에 비해 더 낮다.

³ One-diode 모델은 IEC 60904-5 에 따라 사용된다. Two-diode models 이 더 정확할 수 있으나 사용자의 노력을 훨씬 더 많이 요구한다.

주요 혹은 가장 자주 접하게 되는 오차의 요인들	모듈 위 센서의 위치, 반복성 및 오퍼레이터에 의한 설치 방법, 뒷면-셀 보정 방법	IEC 60904-5 에 따른 ECT 는 접촉 온도측정과 비교를 필요로 하고, 모델 계수용으로 기상조건에 매우 민감: 다양한 조건에서의 ECT 교정은 온도의 오차를 불러올 가능성이 큼	오퍼레이터 오류: 모듈과 카메라 사이 각도, 방사를 설정 보정, 주위 지역의 영향(천공 인근의 모듈: 큰 온도 차이, 타 물체로부터 IR 반사)
단점	뒷면 설치된 센서는 셀 온도로 보정한 결과여야 하고[2], 셀에서 뒷면으로의 열 전달은 시간상 지체 (기상조건이 변화하는 동안에 중요); 센서 설치와 유지관리 작업의 강도 높음; 전면 온도를 측정할 수 없음(조사강도 차단이 요구되는데, 그렇게 되면 모듈에 음영이 발생)	결정된 온도는 모듈 표면에 걸쳐 균일한 온도를 가정(표면온도 차이 ΔT 를 결정할 수 없음); 모듈(잠정적으로)이 MPP 에 있지 않아 시스템 거동에 영향을 줄 수 있음; 시계열 적용할 경우 시스템이 복잡해 질 수 있음	대체 방법보다 비용이 더 비싸다; 오퍼레이터 오류에 더 민감; 절대 온도 측정이 대체방법보다 덜 정확함

4.3.3 기상 데이터

모듈 성능과 안정성에 대한 깊은 이해와 시뮬레이션을 위해서는, 면내 조사강도와 모듈온도 외에 다른 환경 파라미터에 대한 정보가 필요하다. 그림 20 의 막대 그래프는 통상적으로 측정하는 여타 기상 센서들을 요약한 것이다. 분광 조사강도 데이터의 평가는 5.3.4 절에서 별도로 논의할 것이다.

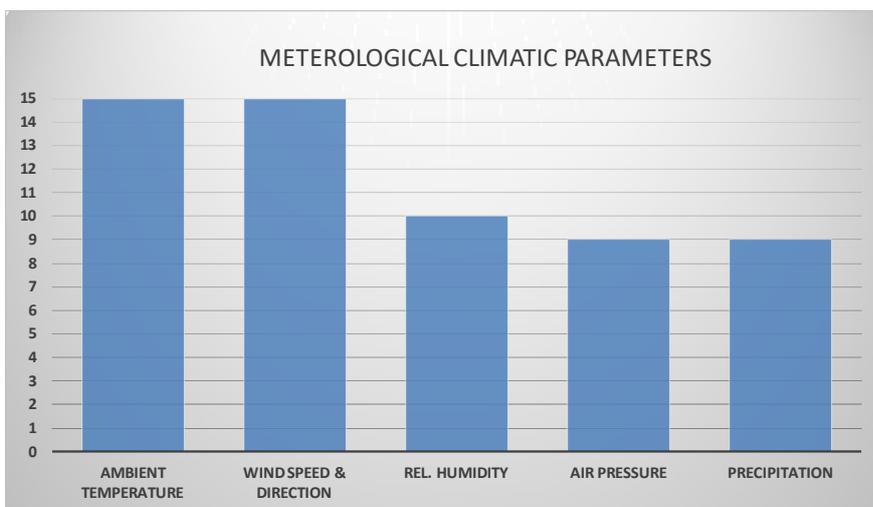


그림 20: 각 시험시설에서 측정한 환경 파라미터.

15 개 기관 모두 시험설비에는 주위 온도와 바람 상태 측정용 센서가 장착되어 있고, 9~10 개 기관은 상대습도, 공기압 및 강수량을 측정한다.

IEC 61724-1 기술적 가이드라인[2]은 오염 비율과 적설 범위를 포함한 환경 센서를 어떻게 설치하고 운용하는지에 대한 권장사항을 제공한다.

4.3.4 분광 조사강도

시간 경과에 따라 태양광 에너지수율에 미치는 분광 변화의 영향이 총 조사강도와 온도 같은 다른 인자만큼 크지는 않더라도 무시하지 않고 고려하여야 한다. 다른 태양광기술보다 분광 변화에 의해 더 영향을 받는 셀 기술들도 있다[9,54,55,56,57,58,59,60,61,62]. 분광 영향을 고려하기 위한 가장 좋은 방법은 분광 조사강도를 측정하는 것인데, 만약 이것이 가능하지 않을 때는 시뮬레이션한 데이터를 사용할 수 있다. 아래에서는 이 두 가지 방법에 대해 기술하고자 한다.

측정된 스펙트럼

분광복사계(spectroradiometers)는 분광 조사강도, 즉 모듈 표면이 받게 되는 빛의 파장별 출력 밀도를, W/m^3 , $W/m^2/nm$, $W/m^2/\mu m$ 단위로 측정하는 기기이다. 크게 2 부류-스캐닝(scanning) 분광복사계(혹은 모노크로메이터)와 어레이 탐지(array detector) 분광복사계 (혹은 다색광원기(polychromator)-의 기기들이 있다.

두 유형은 빛을 모아 기기 내부로 유도하는 적분구(integrating sphere), cosine correctors 혹은 테프론 산광기(diffusers)와 같은 광학 부품을 가지고 있다. 일부 경우에는 광섬유가 광학부품을 기기 벤치와 연결한다. 광섬유 길이와 직경뿐 아니라 입력 광학 부품 유형과 소재의 선택은 스펙트럼의 일부와 기기에 도달하는 복사량에 영향을 미친다.

광학 벤치로 들어가기 전에 빛은 입구 슬릿을 통과하는데, 이 슬릿이 명백한 물체를 정의하고 선수각(angle of entrance)뿐 아니라 빛의 양도 결정한다. 이들 인자들은 기기의 최종 분광 해상도와 직접 관련이 된다.

분광복사계의 중심 부분은 격자(grating)인데, 이는 입사되는 빛을 그 분광 성분별로 회절시키는 요소이다. 스캐닝 분광복사계의 경우, 격자는 한번에 하나의 특정 파장을 회절시킬 수 있도록, 즉 특정 파장의 포톤만 다음 탐지기(detector) 요소에 도달하도록 회전한다. 연속적인 회전은 특정 범위의 파장을 스캔하기 위해 이루어진다. 이런 이유로 스캐닝 분광복사계에는 기계적으로 움직이는 부품이 장착되어 있는데, 이는 안정된하우징으로 보호해야 하고, 그 때문에 좀 더 무겁고 수송하기 어렵다. 일부 기기들에는 더블 모노크로메이터가 장착되어 있는데, 이는 미광(stray light)의 영향을 크게 줄이고 광학 성능을 향상시킨다. 어레이 탐지기 분광복사계는 회절 격자를 여러 개의 파장에 해당하는 다중 이미지를 동시에 만드는 방식으로 다르다. 이는 줄이 쳐진 격자(격자 표면에 평행 홈들)나 혹은 홀로그래픽 격자(사인 함수로 변화하는 굴절률 가진)로 얻을 수 있다. 다색광원기 격자는 움직일 수 있도록 되어 있지 않다. 이 때문에, 이들 기기들은 회전하는 모노크로메이터를 사용하는 것들보다 더 작고 가벼워서 수송에 더 적합하다. 두 유형의 기기에서 또 다른 차이는 데이터 수집 시간이다. 격자의 회전 때문에 모노크로메이터가 전체 탐지가능한 분광 범위를 스캔하는데 몇 분이 소요된다. 다색광원기는 빛의 탐지가 동시에 이루어지므로 수집 시간은 훨씬 더 짧지만, 수 마이크로 초에서 수초 정도이다. 따라서

다색광원기는 구름의 빠른 통과와 같은 급히 변하는 기상 조건에 의해 야기되는 측정 스펙트럼에서의 왜곡 경향이 덜하다.

단일(모노크로메이터의 경우) 혹은 다중(다색광원기의 경우) 탐지기 요소들은 들어오는 빛의 에너지를 전용 소프트웨어의 도움을 받아 시그널 세기의 값으로 변환한다. 탐지기 소재가 기기에 의해 탐지될 수 있는 상단의 파장 한계를 결정한다. 가장 널리 사용되는 소재는 Si 과 InGaAs 로 각각 1117 nm 와 1700 nm 까지 탐지할 수 있다[63]. 밴드갭 에너지가 더 낮은 소재들은 2200~2600 nm 범위의 탐지 한계를 제공할 수 있지만, 훨씬 더 고가이다. 모노크로메이터는 보통 탐지기로 광전자 증배관(photomultiplier tube: PMT)을 사용하고, 다색광원기의 픽셀 어레이는 전하결합소자(charge coupled device: CCD) 혹은 광다이오드(photodiode) 어레이로 구성한다.

여러 잡음(noise) 요인들이 분광복사계로 측정된 스펙트럼에 영향을 미친다.

- 판독 잡음: 내부 요소들과 그 작동의 특성에 의해 야기된다.
- 산탄(shot) 잡음: 탐지기에 입사되는 포톤 개수의 통계적인 변화와 관련된다.
- 다크(dark) 잡음: 입사광이 없을 때 전자들의 열 생성과 관련된다.
- 고정 패턴 잡음: 이웃하는 픽셀 사이의 광 응답의 변화에 의해 야기된다.

일부 잡음은 전용 소프트웨어 내에서 데이터 수집 설정을 변경하거나 혹은 외부 인자들(주위 온도)을 조정함으로써 최소화할 수 있다. 잡음이 구성 요소들의 특성과 상호 연결 등 기기에 고유한 인자와 관련되어 수정할 수 없게 되는 경우도 있다. 이렇게 분광복사계의 적절한 설정과 사용은 상당히 복잡하기 때문에 측정된 스펙트럼을 검증하기 위해서는 경험이 요구된다.

최근 더 많은 시험설비들이 한층 개선된 분광복사계를 채택하였다. 그림 21 은 15 개 시험기관에 설치된 분광복사계를 요약한 것이다. 측정할 수 있는 파장 범위와 그 방향에 차이가 있다. 센서 유형에 따라 1100, 1700 혹은 2500 nm 의 파장까지 도달할 수 있다. 더 짧은 파장의 경우, 센서는 220~350 nm 사이에서 응답하기 시작한다. 9 개의 분광복사계는 고정된 면의 스펙트럼을 측정하고, 그 중 8 개는 경사면에 대해 하나는 수평면에 대해 측정한다. 2 개는 2-축 트랙커 위에 설치되어 있다.

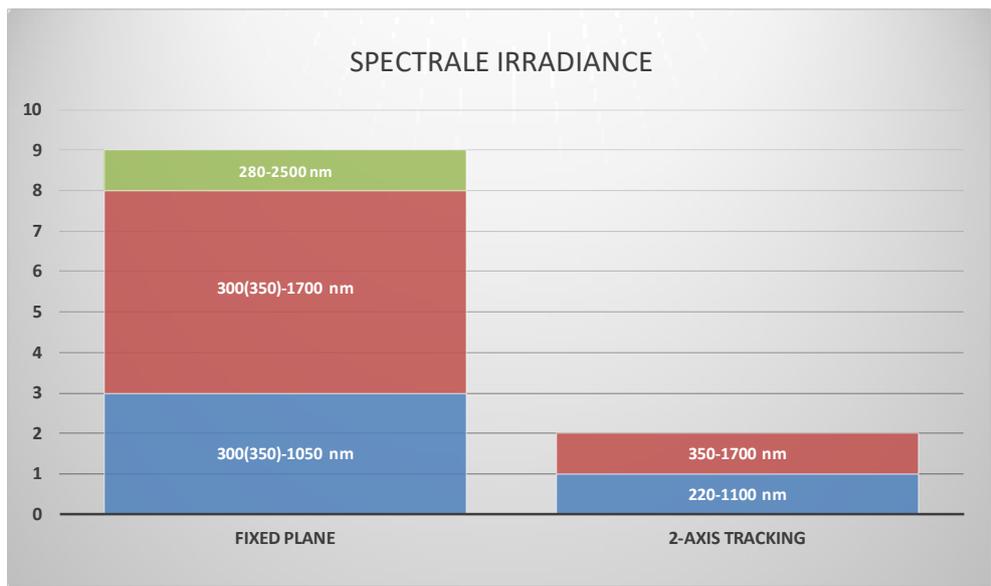


그림 28: 분광 조사강도 측정에 대한 피드백 (분광 범위와 설치 유형).

위에서 언급한 복잡성을 극복하고 상호 정보교환을 증대시키기 위해 스펙트럼 측정의 상호 비교가 세계 곳곳에서 여러 차례 추진되었다. 태양광 스펙트럼 중에서 자외(UV) 부분은 인간의 건강에 미치는 영향 때문에 여러 번의 상호비교에서 높은 관심의 대상이었다[64,65,66,67,68,69,70,71,72]. 최근 10 년 사이에 지표면에서 다른 스펙트럼 영역의 분광 조사강도 측정에 대한 관심이 크게 증가하였는데, 이는 해당 영역 자체가 태양광 분야에 미치는 영향이 크기 때문이다. 최근의 상호비교 캠페인 역시 가시광과 적외선 같이 태양광 소재에 민감한 영역에 초점이 맞추어져 있다. 주요 캠페인은 표 5 에 요약되어 있다. 서로 다른 분광복사계로 얻은 측정 사이의 차이는 보통 $\pm 10\%$ 범위 내이다. 그럼에도 불구하고 일부 경우에는, 측정과 교정 절차뿐 아니라 기기의 설정과 운영 절차와 관련한 문제 때문에 더 큰 차이가 날 수도 있다.

표 5: 태양광에 큰 영향을 스펙트럼 영역 측정용 분광복사계의 상호비교 캠페인. GHI: 글로벌 수평면 조사강도, DNI: 법선면 직달 조사강도, SM: 단일-모노크로메이터, DM:더블 모노크로메이터, P: 다색광원기.

참고문헌	[73]	[74]	[75]	[76]	[77]	[78]
연도	미보고	1999	2013	2011	2012	2015
장소	Lough-borough, UK	El Arenosillo, Spain	Golden, USA	Portici, Italy	Catania, Italy	Madrid, Spain
측정 대상	GHI	GHI, DNI	GHI	GNI, DNI	GNI, DNI	GNI, DNI
기기의 개수	7	4	10	6	7	12
스펙트럼 범위 (nm)	350~1050	400~700	380~1100	360~1700	360~1700	300~1100 300~1700
기기 유형	P	SM, DM, P	SM, DM, P	SM, P	SM, P	SM, P

시뮬레이션한 스펙트럼

태양광 스펙트럼의 측정이 항상 가능한 것은 아닌데, 이는 분광복사계의 비용과 교정, 소프트웨어 설치, 운영 및 유지관리에 전문지식이 필요하기 때문이다. 이런 이유로 태양광발전소에서 스펙트럼 데이터의 가용성은 전세계에서 가능한 곳이 거의 드물고, 주로 과학적인 목적으로 사용된다. 여기에 대한 온전한 대안으로, 일련의 대기 관련 파라미터와 지리적 좌표가 주어졌을 때 소위 "복사전달 모델(Radiative Transfer Models: RTM)"을 사용하여 태양광 스펙트럼을 시뮬레이션하는 것이다. 이런 도구들의 바탕에는, 포톤과 방사, 산란, 흡수와 반사를 포함하는

대기에서의 구성 성분과의 상호작용을 고려함으로써 우주로부터 지표면으로 전달되는 복사의 물리적 과정을 기술하는 "복사전달 방정식(Radiative Transfer Equation: RTE)"이 자리잡고 있다.

일반적으로 RTM 은 3 개의 주요 범주로 나누어진다.

- 복잡하고 엄밀한 모델(sophisticated rigorous models)
- 매개변수 모델(parametric models)
- 통계적인 모델(statistical models)

첫 번째 모델은 복사전달 방정식을 실행하고 하나의 이산 종좌표 방법(discrete ordinate method)을 사용하여 각 스펙트럼 파장에 대해 수치적인 방법으로 이를 푼다. 이 모델은 또한 "line-by-line" 모델이라고도 부르는데, 분자 흡수의 프로세스를 각 가스 종 혹은 대기를 구성하는 에어로졸의 스펙트럼 선 기여분의 합계로 다루기 때문이다. 이런 모델의 사례들이, LOWTRAN [79], MODTRAN [80,81], SBDART [82], SBMOD [83], STREAMER [84], FASTCODE [85], UVSPEC [86]이다. 이 계열에 속하는 RTM 은 결과의 정확도가 높는데, 실행 시간은 매우 길 수 있다. 이 결점을 극복하기 위해 이들 모델의 일부는 알고리즘을 간편하게 만든다. 가장 흔한 것 중의 하나가 소위 "correlated K-distribution approximation"라고 부르는 것이다. 가스상의 흡수 계수에 대한 동일한 세트의 값들을 주어진 스펙트럼 밴드에서 여러 차례 접하기 때문에 이들 값들을 그룹화하여 계산의 중복을 제거한다. 예를 들어 correlated k-approach[87]의 경우, 전체 스펙트럼에서 32 개 밴드로 작업하고, 투과율 계산은 각 파장별로 한 번 하는 것이 아니라 주어진 밴드 하나마다 한 번씩 이행한다. 또 다른 중요한 단순화는 MAGIC[88]와 SPECMAGIC[89]에서 이행한 알고리즘을 가지고 한다. 이 방법은 색인표(LUT)를 사용하는데, 이는 미리 계산된 이산(discrete) 복사전달 모델 결과이다. 일단 LUT 가 가용하면, 주어진 대기 상태에서의 투과율은 런타임 계산을 대체하는 내삽에 의해 LUT로부터 추출할 수 있다.

두 번째 매개변수 모델에서는, 복사전달 방정식을 간편한 매개변수화된 표현으로 대체할 수 있다. 이런 도구들은 허용 가능한 범위의 정확성을 보증하면서도 더 빠른 계산이 가능하고, 사용자 친화적 인터페이스를 가능하게 한다. 이들은 1980 년대 초부터 문헌에 나타났는데, 엔지니어링 활용분야에서 손쉬운 해결책을 제공할 목적이었다. 이런 모델의 사례들이, SPCTRAL2 [90], SEDES [91], SMARTS1 [92] 그리고 SMARTS2 [93]이다.

세 번째 통계적인 모델은 포톤과 대기 구성 성분 및 표면의 상호작용을 주로 몬테카를로 기법을 사용하여 통계적인 프로세스로 다룬다. 일단 시스템이 설정되면 무작위 포톤들이 매체 안으로 방사되고, 그리고 평균 자유행정에 따라 무작위 거리 후에 그 도메인을 떠나기 전까지 흡수되거나 산란된다. 상호반응 길이, 산란 각도 및 흡수율은 사용자가 선택한 확률 밀도 함수(probability density functions: PDF)를 바탕으로 결정된다. 전체 프로세스 동안에 포톤들은 하나씩 추적되고, 그들이 스펙트럼을 얻기 위해 매체를 떠나는지가 카운트된다. 이런 사례들로, MYSTIC [94], GRIMALDI [95] 그리고 BRITE [96]가 있다.

모델을 구분하는 다른 기준이 있는데, 예를 들어 파장 범위 및 해상도, 편광의 포함, 도메인의 기하, 라이선스 유형, 얼음과 물 구름 취급 용량, 생성된 산출물의 유형, 사용자 인터페이스 등이다. 일반적으로 가용한 어떤 모델도 최선이라고 규정할 수는 없다. 대신에 특정 활용분야와 해결해야

할 문제에 따라 더 적절한 모델들이 있다. 다양한 환경조건 하에서 다양한 RTM 들의 결과를 비교하기 위해 많은 노력을 해왔었고 아직도 노력 중이다. 가장 유명한 것의 하나가 EU의 Joint Research Center 가 주선한 복사전달 모델 상호비교(Radiation Transfer Model Intercomparison: RAMI)[9]인데, 이는 적절하게 설정한 규칙과 기준 하에서 RTM 의 역량, 성능 및 협정을 평가하기 위한 하나의 플랫폼으로 구성되어 있다.

5 데이터 품질 제어와 유지관리 관행

시험결과의 신뢰성과 정확성은 선택된 하드웨어뿐 아니라 이행된 품질제어 방안에도 크게 좌우된다. 특히 수년간 지속되는 장기 측정 캠페인의 경우, 효율적인 데이터 수집과 하드웨어 제어가 필요하다. 원격지 사이트나 극한 기후인 경우 이는 더욱 더 문제가 된다.

5.1 품질 마커

설문조사는 시험기관의 데이터 품질 수준이 일반적으로 매우 높고 많은 수의 데이터 품질 마커(marker)가 이행되었음을 강조하고 있다. 그림 22 는 15 개 기관의 일반적인 오차 마커와 이행 수준을 요약한 것이다[16,31]. 잘못되거나 낮은 품질의 데이터를 세심하게 필터링하는 것은 쉽게 할 수 있다. 이메일 경보가 문제들을 알려주는데 가장 널리 사용되는 도구이다.



그림 22: 데이터 품질 제어의 유형(오차 마커들)과 이를 이행하는 시험기관의 개수.

5.2 유지관리

장비의 규칙적인 교정 외에, 육안검사와 센서의 청소 같은 다른 품질제어 조치는 표준 관행이다. 그림 23 은 조치가 이행되는 빈도뿐 아니라 15 개 기관의 서로 다른 유지관리 조치의 이행 수준을 보여준다.

모듈의 청소는 사이트에 따라 매우 다르다. 모든 기관들이 규칙적으로 모듈을 청소하지 않지만, 언제 청소할 지 잘 정의된 기준을 가지고 있다. IEC 61724-1 규격은 오염 비(soiling ratio)가 어떻게 모니터 될 수 있는지에 대한 제안을 하고 있다.

소수의 기관들만 웹캠을 설치하고 있는데, 이는 대부분의 경우 원격지 시스템에 사용된다.

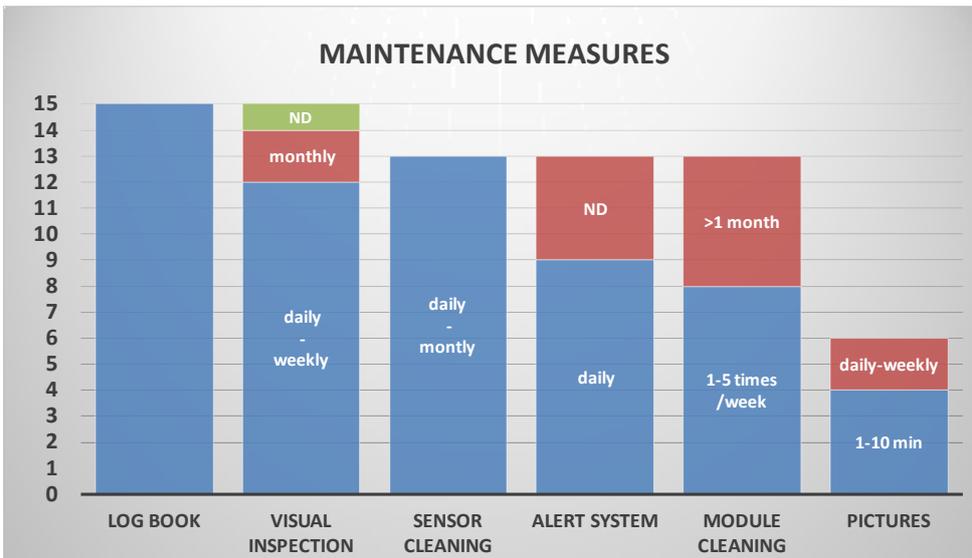


그림 9: 15 개 시험기관에 의해 이행되는 유지관리 조치의 유형과 빈도에 대한 피드백.

6 시험 모듈의 특성분석

이번 장에서는, 통상적으로 어떻게 얼마나 많은 태양광모듈이 선택되는지 그리고 현장에 설치하기 전에 어떻게 특성분석을 하는지에 대한 개요를 소개하고자 한다. 모든 정보는 설문조사와 일반적 권장사항에 대한 그림으로 보강한다.

6.1 모듈 선정/샘플링

그림 24 는 암 상태에 저장한 기준 모듈 혹은 예비 모듈의 가용성을 포함한 통상적인 시험 시료의 개와 각 그룹 내에서 서로 다른 접근방법에 대한 빈도를 요약한 것이다. 대부분(15 개중 10 개 기관)은 유형당 2~3 개 모듈을, 일부는 유형당 5 개까지, 15 개중 3 개 기관은 시험시료를 단일 모듈로 한정한다.

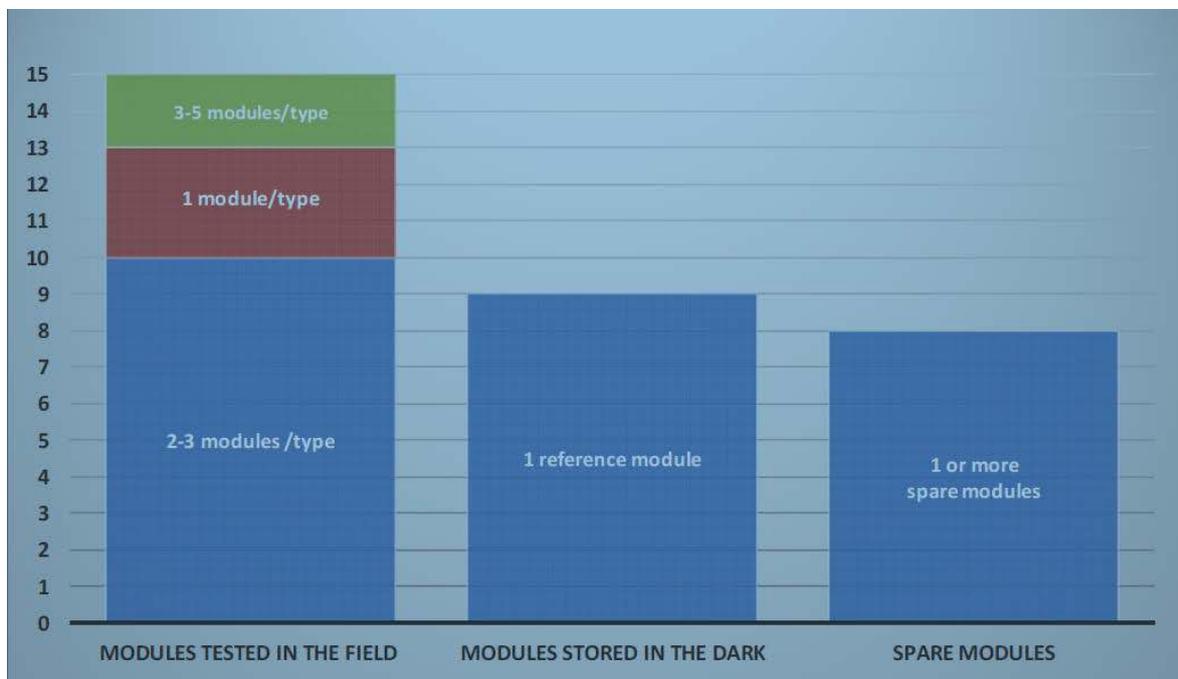


그림 24: 15 개 기관 내에서 시험 시료의 가용성 (시료 개수, 기준 모듈, 예비 모듈).

특정 규칙은 없지만 동일 유형당 시험 모듈은 1 개 이상을 권장한다. 장기측정 캠페인 같은 특별한 경우에는 하나 이상 하는 것이 장점이 될 수 있고, 사용자가 중복 확인을 할 수도 있고, 하나의 모듈에 불량일 경우를 대비한 예비용이 될 수도 있다. 예외는 모듈의 특성분석의 범주나 혹은 프로토타입 시험과 같은 단기 측정 캠페인인 경우로 이 때는 일반적으로 1 개의 모듈로 충분하다. 통계적으로 적절한 개수의 모듈 시험은 비용이나 소요되는 공간 때문에 생략한다.

기준 소자로 사용하기 위한 목적으로 암 상태에서 하나의 여분 모듈을 저장하는 것은 규칙적인 STC 제어 측정을 할 때 매우 유용한 것으로 여겨진다. 암 상태 저장 기준 모듈을 가진 9 개 기관은 또한 자체의 솔라 시뮬레이터를 보유하고 있어 STC 조건에서 성능 측정을 할 수 있다. 기준 모듈의 STC 출력은 옥외 노출 모듈과 함께 측정하는데, 이는 암 상태 보관 모듈을 가지고 확보한 것과

같이 발생할 수 있는 어떤 열화율을 탐지하고, 측정 반복을 통해 실질적인 열화를 식별하기 위함이다. 다른 기관들은 7.3 장에 기술한 접근방법의 하나에 따라 열화율을 계산한다.

예비 모듈의 가용성도 권장하고 있는데, 15 개 중 8 개 기관이 이를 충족한 것으로 신고하였다.

모듈을 선택하는 기준과 누가 이를 선택할 지가 매우 중요한데, 특히 선택이 최종 결과에 큰 영향을 미치는 벤치마킹 연구의 경우에 그러하다. 이 문제에 대해서는 7.1 장에서 보다 상세히 논의할 것이다. 샘플링 방식과 관련하여 규칙적으로 인용되는 2 개의 규격은 IEC 60410 혹은 ISO 2859-1 이지만 시험의 목적에 따라 달라지고, 가끔은 개별 샘플링 절차가 더 적절할 수 있다. 목적은 허용 가능한 범위 내에서 시료의 개수를 줄이는 것인데, 이는 시험결과를 더 많은 수의 모듈에 이전할 수 있는지와 함께 시험 비용 사이에 균형이 요구된다. 현재 벤치마킹 측정을 어떻게 운용할 지에 대한 상호 협의는 없다.

15 개 기관 중 7 개는 특정 기준(예: P_{nom} 에 가장 가까운 제조업체의 평균 출력)에 따라 모듈을 선택하였다고 신고하였다. 모듈은 제조업체에 의해 발급된 플래시(flasher) 리스트를 통해 확인하거나 혹은 자체 출력 측정을 토대로 확인한다. 접근방법을 명시하지 않은 다른 8 개 기관은 아마도, 자체 샘플링 절차를 가진 생산자로부터 직접 모듈을 받았거나 아니면 모듈을 익명으로 매입한 것이다. 후자의 경우에는 하나의 특정 모듈을 선택할 가능성은 거의 없다.

모든 리포팅은 다음 접근방법을 분명히 밝혀야 하고, 그 접근방법은 비교된 모든 모듈 기술과 유형에 대해 동일하여야 한다. 샘플링 절차는 이행하는 측정의 범주에 따라 달라질 수 있다.

잠재적으로 최대 출력 산출량에서의 허용 여유가 넓기 때문에, 7.1.2 에 기술된 바와 같이 에너지수율 시험용 시료는 생산 제품에서 무작위로 선택할 것을 권장하고 있다. 출력 등급별로 최소 5 개의 시료를 IEC 61215 에 따라 전기적 안정화를 시키고 전계발광 분석을 한다. 공칭 출력 대비 가장 차이가 적은 시료를 선택할 수도 있다. 특별히 c-Si 시료는 셀의 균열이 없어야 하는데, 옥외 노출 도중에 균열의 전파는 출력 열화를 더 증가시킬 수 있기 때문이다. 그러므로 옥외 노출 전에 사전 시험을 하는 것이 매우 중요하다.

6.2 사전 시험과 제어 측정

현장에 설치 전에, 모듈은 일련의 품질평가 그리고/혹은 특성분석을 거쳐야 한다. 시험의 일부, 특히 STC 측정은 측정 캠페인의 마지막에 혹은 규칙적 간격으로 반복한다. 그림 25 는 통상적으로 수행된 시험의 개요를 보여준다.

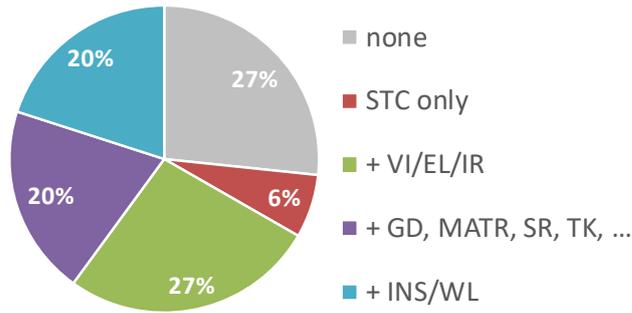


그림 105: 옥외 노출 전 이행하는 옥내시험(사전 심사)의 빈도 .

범례: 표준시험조건(STC), 육안검사(VI), 전계발광(EL), 적외 이미징(IR), 조사강도 의존성(GD), 온도계수(TK), 폴 매트릭스(MATR), 분광응답(SR), 절연시험(INS), 습윤누설(WL).

참여기관의 73 %는 STC 출력을 측정한다. STC 출력은 모듈 에너지수율(Y_p)의 정규화와 모듈 성능비(MPR)에 사용되는 핵심 파라미터이다. 27 %의 다른 기관들은 예비시험을 이행하지 않고 완전히 옥외시험에 의존하거나 혹은 제조업체가 발급한 데이터 시트나 플래서 목록에 의존한다. 이는 솔라 시뮬레이터를 보유하지 않은 기관의 경우에 해당한다. 일부 기관은 자격을 갖춘 시험소에 모듈을 보내 STC 측정을 이행한다. STC 출력의 원천과 그 불확도 혹은 공칭 출력의 허용오차는 항상 명시되어야 한다.

문헌에 보고된 바와 같이[98], 대부분의 기술들은 초기 열화나 성능 상승을 겪는데 STC 측정을 이행할 때 이점을 고려하여야 한다. 적절한 전처리 절차는 특히 공장에서 오는 모듈에 적용하여야 한다. 일부 기술의 경우에는, 암 상태 보관이 태양에 기 노출된 이후에도 편차로 이어지게 된다[99]. 최근 발간된 규격 IEC 61215 (2016)는, 시작 때 혹은 어떤 스트레스 시험 후 둘 다 STC 출력을 결정하기 위해 각 기술별로 어떻게 안정화시켜야 하는지 분명한 지침을 주고 있다. 자체 STC 측정을 이행하는 참여기관의 절반은 기존 규격[100] 혹은 자체로 정의한 절차에 따라 모듈 전처리 한다는 것을 강조하였다. 일반적으로 전처리는 현장에서 모듈해체 후 곧바로 측정할 때나 혹은 그 기술이 안정하다는 증거가 있으면 생략할 수 있다. 사용된 접근방법의 검증 증거는 반드시 제공되어야 한다.

참여기관의 27 %는 STC 측정에 육안검사나 다른 광학적 검사 방법을 추가하는데, 결함을 확인하기 위한 전계발광 그리고/혹은 적외 이미지가 그러하다. 참여기관의 또 다른 20 %는 온도계수의 측정, 낮은 조사강도 성능, 분광응답 및 IEC61853-1 에 따른 폴 매트릭스 측정도 이행하는 등 폭넓게 전기적 특성분석을 한다. 또 다른 20 %는 습윤누설과 절연시험과 같은 전기적 안전 시험을 포함한다.

7 데이터 분석과 리포트

실제 작동조건 하에서 장기간 측정 작업을 할 때, 데이터 처리의 품질은 데이터 측정 그 자체만큼 중요하다. 7 장에서는, 벤치마킹 목적으로 어떻게 데이터가 분석되는지, 성능 손실의 조사, 열화율의 계산, 측정값을 시뮬레이션한 시계열과 어떻게 비교하는가에 대한 여러 사례들을 소개하고자 한다. 측정 불확도의 영향과 생산 허용한도를 고려하면서, 방정식, 필터링 접근방법 및 통상적인 데이터 제출에 대해 리포팅한다.

7.1 모듈 에너지수율 벤치마킹

7.1.1 에너지수율 평가

태양광모듈의 에너지수율 성능은 대표성이 있는 기간에 걸쳐 특정 기후에서의 옥외측정을 토대로 한다. 에너지 산출량은, 시간 스텝 τ (시간의 함수로 주어진 데이터 기록 간격) 동안 기록된 태양광모듈의 최대 출력값($P_{max,n}$)을 적분한 것이다. 에너지(E)는 통상 kWh 로 나타낸다. .

$$E = \sum_k P_{max,k} \times \tau_k [kWh]$$

데이터 포인트의 이론적 개수(n_{TH})는 데이터 기록 간격에서의 일광시간과 데이터 기록 간격(τ)의 지속시간으로부터 계산한다. 일광 시간은 데이터 기록 기간 중에서 각 날짜별로 일출과 일몰 시간으로부터 도출한다.

$$n_{TH} = \sum_{\text{Days of year}} \frac{\text{Hours of daylight}}{\tau}$$

하나의 사례로,

그림 26 은 연중 일광시간의 변화를 보여준다. 청색 수평선으로 마크된 위도 40°N 은 근사적으로 뉴욕시, 마드리드와 베이징을 대표한다.

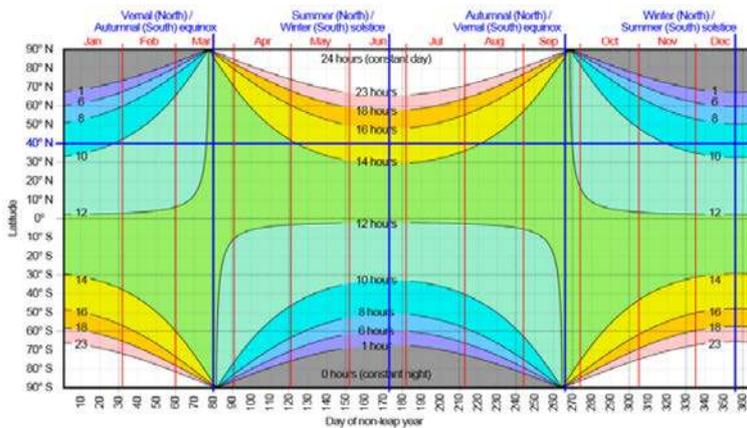


그림 11: Sunrise 방정식에 기술된 가장 정확한 모델을 사용하여 위도와 연중 날짜별의 함수로 나타낸 일광 시간의 등고선 플롯. 기준으로 위도 40° N 가 강조되어 있다. source

https://en.wikipedia.org/wiki/Sunrise_equation#/media/File:Hours_of_daylight_vs_latitude_vs_day_of_year_cmglee.svg.

실제로, 데이터 포인트의 이론적 개수는 다양한 영향으로 인해 줄어들어 사용 가능한 데이터 포인트가 더 적어진다.

- 기상 파라미터용 측정 시스템의 비작동 시간
- 전자 부하의 비작동 시간
- 타당해 보이지 않는 기록으로 인한 데이터 포인트의 폐기
- MPP 트래킹 불량으로 인한 데이터 포인트의 폐기
- 동일한 타임스탬프를 가진 불완전한 데이터 포인트의 폐기
- 모듈의 음영 혹은 시험 면에서 조사강도의 급속한 변동에 기인한 데이터 포인트의 폐기 (구름의 이동으로 인한 불균일한 조사강도)
- 중복(반복) 데이터 기록의 폐기

에너지수율 측정용 데이터 가용성은 아래 식과 같이 계산된다.

$$Data\ availability = \left(1 - \frac{Useful\ number\ of\ data\ points}{Theoretical\ number\ of\ data\ points}\right) \cdot 100\%$$

고품질에 높은 정확도의 에너지수율 측정에 필요한 일반적 요건에 대해서는 2.1 과 4.2 장에서 이미 논의하였다. 데이터 요건의 핵심 개요는 다음과 같다.

- 데이터 모니터링의 기간은 시험 사이트에서의 실제 작동상태를 고려하기 위해 기상학적으로 온전히 일년을 커버한다.
주: 짧은 기간의 에너지수율 측정이 필요한 상황도 있을 수 있다. 예를 들어, 모듈 제조업체가 에너지수율 성능에 관한 다른 소재의 영향을 조사하기를 원할 경우이다(즉, 전면 유리의 유형 혹은 특정 유리 코팅의 유형).
- 데이터 기록 간격 τ 은 60 초 이하로 조사강도 변동을 탐지할 수 있는 범위이다.
- MPP 데이터의 측정과 기상 측정은 동기화되어야 한다.
- 에너지수율 측정용 데이터의 가용성은 90 %보다 커야 할 것이다.

시험 사이트에서의 기상 조건 변화 때문에 서로 다른 태양광모듈의 에너지수율 시험을 순차적으로 하는 것은 문제의 소지가 있다. 태양광모듈 벤치마킹은 시간상으로 동기화된 에너지수율 측정을 토대로 해야 할 것이다. 에너지수율 성능의 순위는 "태양광모듈(어레이) 에너지수율"(Y_a)이나 혹은 "태양광모듈 성능비(MPR)"로 나타낼 수 있다.

$$Y_a = \frac{Measured\ energy\ yield\ (E)}{Reference\ power\ (P_{stc})} \left[\frac{kWh}{kW_p} \right]$$

$$MPR = \frac{Measured\ energy\ yield\ (E)/Reference\ power\ (P_{stc})}{Measured\ solar\ radiation\ (H)/Reference\ irradiance\ (G = 1000 \frac{W}{m^2})}$$

Y_a 는 서로 다른 P_{stc} 를 가진 모듈의 비교를 가능하게 하고, MPR 은 서로 다른 조사강도(다른 사이트에서 측정하였거나, 방향이 다른 경우, 시험 기간이 다른 경우에 해당)의 모듈도 비교할 수 있게 해준다. 후자는 입사 에너지나 혹은 시간 스텝 τ (데이터 기록 간격)에서 기록된 조사강도 (G_n)의 적분값인 조사량 H_n 의 측정도 필요로 한다. 조사량 (H) 는 통상 kWh/m² 단위로 표시한다.

$$H_i = \sum_k G_{i,k} \times \tau_k [kWh/m^2]$$

일반적으로 태양광모듈 벤치마킹은 모듈 성능비(MPR)를 바탕으로 하도록 권장하고 있는데, 이 파라미터는 데이터 가용성과 무관하기 때문이다.

MPR=1 은 모듈의 평균 효율이 STC 에서의 모듈 효율에 부합한다는 의미이다. 모듈온도, 낮은 조사각도 거동, 분광/각도 영향 혹은 준안정성으로 인한 성능 손실은 MPR 값이 더 낮아지는 결과로 이어진다. 성능 손실요소는 해당 위치의 기후 조건에 의해서도 달라진다. 단일 성능 손실을 어떻게 분석하는지는 다음 7.1.2~7.1.4 절에 기술되어 있다.

7.1.2 STC 출력의 영향

태양광모듈의 출력 표시

불확도에 가장 크게 기여하는 요인은 STC 출력의 불확도이다.

태양광모듈의 제조에는 다양한 허용오차 요인이 존재한다. 제조 허용오차는 사용된 소재(예: 태양전지의 전기적 특성의 스프레드) 아니면 제조 프로세스(예: 납땜 프로세스의 품질)로부터 유래하는 것이다. 그러한 결과의 하나로, 생산 라인에서 태양광모듈의 최대 출력 산출량은 분포 곡선을 따르는데, 이는 다양한 출력 범위(등급)의 정의를 필요로 한다. 최대 출력 산출량의 전체 스프레드는 모듈 유형의 데이터시트에 문서화되어 있다. 표 6 은 5 W bin 폭을 가진 4 개의 출력등급을 예시적으로 보여준다. 이런 등급분류는 통상적으로 펄스형 솔라 시뮬레이터로 측정된 출력 산출량에 관계되는 것이다. 측정 결과는 일반적으로 플래쉬 리스트(Flash list)에 문서화되어 있다.

표 6: 출력등급에 따른 태양광모듈의 분류.

전기적 데이터 @STC	출력 등급 1	출력 등급 2	출력 등급 3	출력 등급 4
공칭 출력 (Wp)	265	270	275	280
Watt 등급 분류 (W)	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5
공칭 출력 전압 (V)	31.1	31.2	31.4	31.9
공칭 출력 전류 (A)	8.53	8.66	8.76	8.78
개방전압 (V)	38.3	38.6	38.8	39.2
단락 전류 (A)	9.21	9.29	9.40	9.44
효율 (%)	16.1	16.4	16.7	17.0

태양광모듈의 가장 중요한 파라미터는 공칭 출력(P_{nom})으로 Wp(피크 와트)로 표시한다. IEC 60904-3 에 정의된 바와 같이, 이 단위는 공칭 출력이 STC 조건에서 측정된 것을 의미한다. 제조상의 허용오차를 표현하는데 2 가지 관행이 있다.

- 플러스 분류 (즉, 0/+5 W): 공칭 출력은 등급 분류(sorting)의 최저값이다. 모듈의 출력 산출량은 이 허용되는 값보다 커야 한다.

- b) 플러스-마이너스-분류 (즉, ±3%): 공칭 출력은 등급 분류의 평균값이고, 항상 최대값과 최저값 사이에 있다.

모듈 제조업체의 출력 표시 관행은 국제적으로 합의가 되어 있지 않다. 대부분의 경우, 공칭 출력은 플래시 시험에만 적용되는데, 이는 제조 상의 허용오차를 대표할 뿐이다. 그러나 총 출력의 허용오차는 생산 라인에서의 측정 불확도와 잠재적인 전기적 불안정성에 의해 추가적으로 영향을 받을 수 있다. 두 가지 모두 출력 표시에서 반드시 필요한 것으로 고려되지는 않는다.

태양광모듈이 소비자에게 배달되었을 때 그 전기적 출력 산출량은 안정적이지 않을 수 있고, 빛이나 온도에 의해 유발된 영향을 받는다. 2016 년 발간된 IEC 61215-2 규격은 태양광모듈의 전기적 안정화용 시험 절차를 정의한다. 태양광모듈은 각 사이클 당 최저 5 kWh/m²의 조사량으로 조사강도 사이클 시험을 한다. 매 사이클 후에 출력 산출량이 측정된다. 연속 2 회의 사이클에 3 개의 출력값이 나온다(P1: 시초, P2: 중간, P3: 최종). 이들 값으로부터 P_{MIN}, P_{MAX} 및 P_{AVERAGE} 가 결정된다. (P_{MAX} - P_{MIN}) / P_{AVERAGE} 항목이 한계값보다 더 낮으면 태양광모듈은 전기적으로 안정한 것으로 여기는데, c-Si 태양광모듈의 경우 1 %, 박막 모듈의 경우 2 %이다. 안정화 절차는 느리게 진행되는 안정화 프로세스를 탐지하지 못할 수 있음을 주목해야 한다.

기준 출력 P_{stc}의 선택

에너지수율 성능을 표현하는 2 가지 정의에 있어(7.1.1 참조), 기준 출력 산출량은 그 결과에 큰 영향을 미친다. 다음의 옵션들을 선택할 수 있다.

- a) 제조업체가 명시한 그대로의 공칭 출력 P_{nom}
앞에서 설명한 바와 같이, 태양광모듈의 실제 출력 산출량은 공칭 값과 상당히 다를 수 있다. 만약 P_{stc} > P_{nom} 이면 에너지수율 성능이 높게 측정될 것인데, 이는 제조업체에 유리한 결과이다. 그러므로 에너지수율 시험 전에 시료를 전기적으로 안정화시키는 것이 필요하다.
- b) IEC 61215 에 따라 측정된 그대로의 안정화 실제 출력 P_{stc,stab}
이 기준 값이 태양광모듈의 에너지수율 측정에 가장 적절하다. 비교 시험 목적의 모든 시료들을 동일하게 다루어 샘플링이나 출력 표시의 영향이 최소화된다. P_{stc,stab} 는 생산품의 벤치마킹용으로 최적의 파라미터이다.
- c) 옥외 노출시험에서 측정한 그대로의 실제 출력 P_{stc,out}
STC 에서의 실제 출력 산출량을 출력 산출량의 기준으로 사용하면 에너지수율 분석의 정확성을 높일 수 있다. 이는 IV-곡선의 측정과 규격 IEC 60891 을 사용하여 곡선을 STC 에 외삽하는 것을 필요로 한다. 이 방법이 박막 모듈의 준안정성(초기 안정화, 계절적 영향) 거동이나 출력 산출량의 열화를 조사할 수 있는 가능성을 제공할 수 있다.

계산에 사용되는 기준 출력, 그 불확도 그리고 모듈이 어떻게 선택되었는지는 항상 명확하게 제시해야 하며 결과 평가에 반영해야 한다(6.1 장 참조).

그림 27 은 스위스 Lugano 에서 수행된 4-년 기간의 측정 캠페인에서 얻은 순위의 사례를 보여준다. P_{stc,stab} 는 기준값으로 A 등급 솔라 시뮬레이터로 측정된 것이다. 그래프는 c-Si 기준 모듈(c-Si REF) 대비 여러 가지 박막 모듈의 MPR 을 보여준다. 모듈 간에 ±10 %에 이르는 차이가 관찰되었다. 안정화 프로세스의 영향을 배제하기 위해 첫해는 순위표에서 제외되었다.

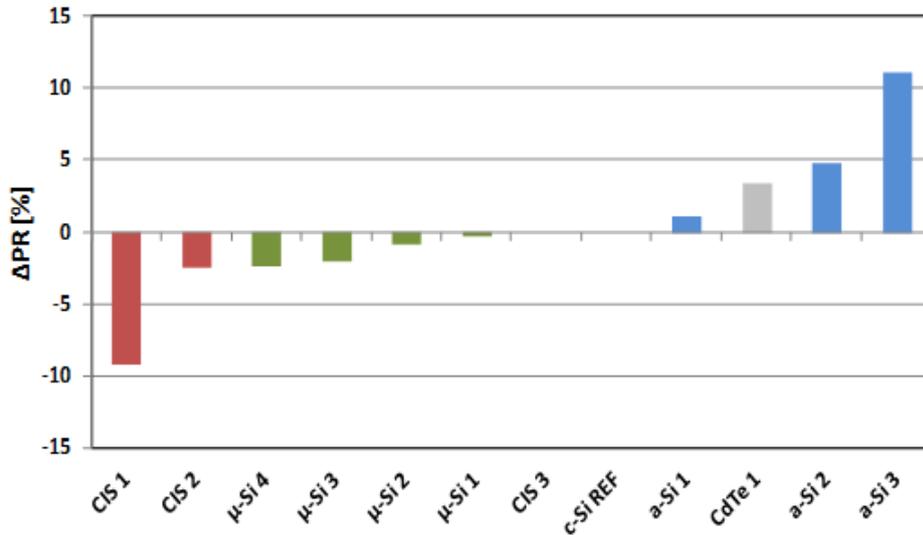


그림 127: 11 개 박막모듈 기술(적색: CIS, 회색: CdTe, 녹색: μ c-Si, 청색: a-Si)에 대해 성능비 차이, $\Delta PR = (PR - PR_{c-Si}) / PR_{c-Si}$ 로 나타낸 박막모듈 순위(2012-2014).

아래 설명과 같이, 이 차이는 서로 다른 모듈 특성과 관련될 수 있다. 문헌[8]에 하나의 사례가 제공되어 있다.

7.1.3 온도, 조사강도, 입사각 그리고 스펙트럼의 영향

태양광모듈의 에너지수율 성능은 태양광모듈의 특성과 기후 조건의 상호 연관성으로 정의된다. 그림 28 은 에너지수율에 미치는 다양한 영향 인자들을 보여준다[101]. 주요 기여도는 아래에 기술되어 있다.

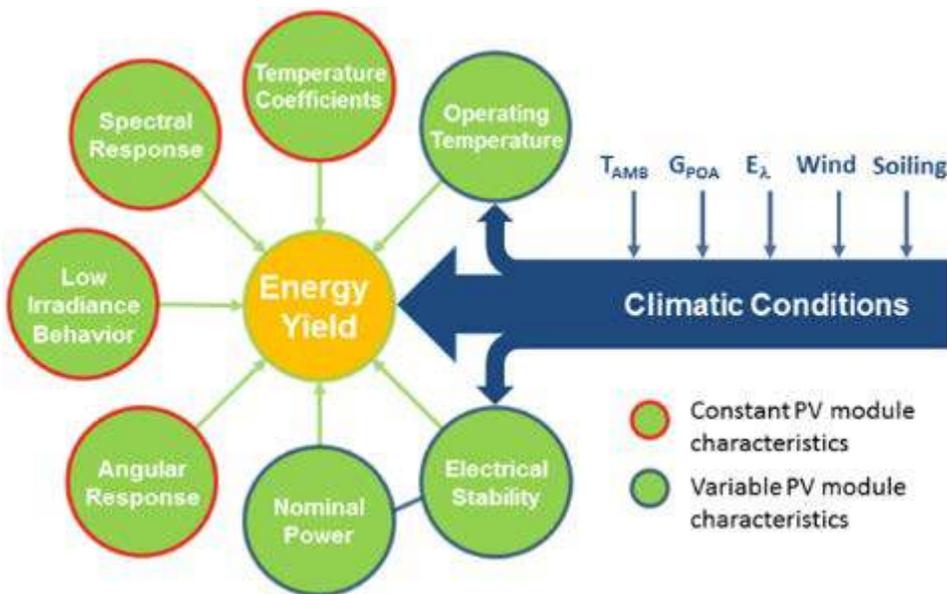


그림 28: 태양광모듈의 에너지수율에 영향을 미치는 인자들.

온도 영향

태양광모듈 수준에서 온도의 영향은 P_{max} 온도계수로 나타낸는데, 이는 IEC 61853-1 에 따라 일정 조사강도에서 온도를 변화시키면서(15~75°C) 측정한다. 그림 29 는 다양한 태양광모듈 유형의 TK- P_{max} 범위를 비교한 것으로, 같은 태양광기술이라도 TK- P_{max} 가 달라질 수 있다는 것을 보여준다. 가장 낮은 값은 CdTe 모듈에서 관찰되고 가장 높은 값은 다결정 c-Si 와 CIGS 모듈에서 관찰된다.

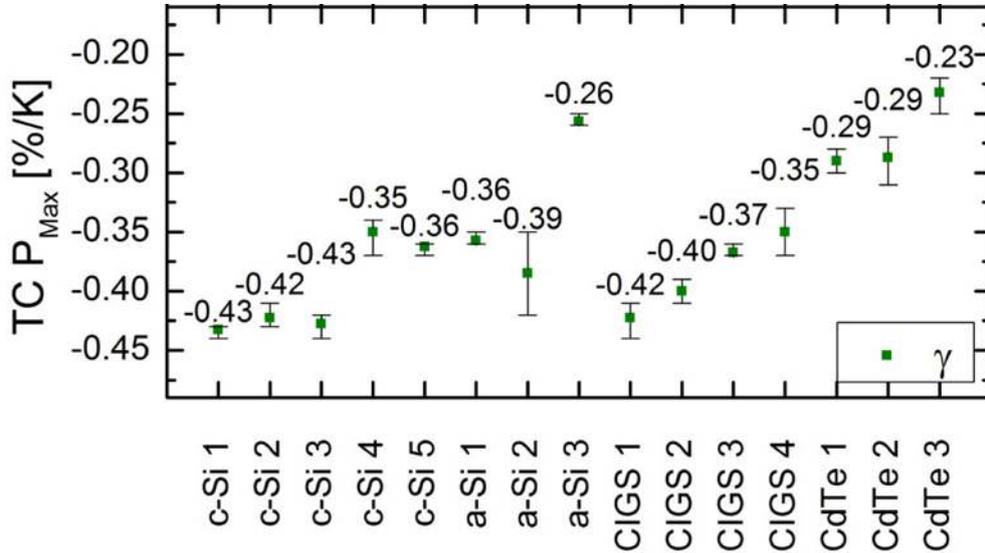


그림 139: 다양한 태양광모듈 유형의 온도계수 [10].

지역의 기후와 관련되는 온도의 영향은 모듈온도로 설명하는데, 이는 낮 동안에도 변하고 계절에 따라서도 변한다. 적절한 파라미터는 연간 평균 가중 모듈온도 $\bar{T}_{mod,G}$ 인데, 이는 다음 방정식으로 계산한다.

$$\bar{T}_{mod,G} = \frac{\sum (T_{mod} \cdot G_i)}{\sum G_i}$$

여기서 T_{mod} 는 모듈온도, G_i 는 면내 조사강도이다. 이 방정식은, G_i 가 한계값 15 W/m² 위에 있으면 단지 모듈온도만이 고려된다는 것을 확인시켜준다. 유리/백시트 표준 구조를 가진 다결정 Si 태양광모듈의 $\bar{T}_{mod,G}$ 는, 독일 쾰른에서는 30°C, 미국 Tempe 에서는 46°C 이다. 따라서, 사막 기후에서는 중간 기후에 비해 7 % 더 높은 온도 손실이 관찰된다. 가장 좋은 것과 나쁜 TK- P_{max} 를 가진 태양광모듈 사이의 에너지수율 성능 차이는 약 3 %이다.

조사강도 영향

에너지수율에 대한 조사강도의 영향은 태양광모듈의 효율곡선으로 나타낸다. 효율곡선은 IEC 61863-1 에 따라 통상 일정한 모듈온도(25°C) 에서 조사강도를 변화시키면서(100~1100 W/m²) 측정한다. 그림 30 은 전형적으로 정규화된 효율곡선을 보여주는데, 이로부터 낮은 조사강도에서의 성능손실을 직접 확인할 수 있다.

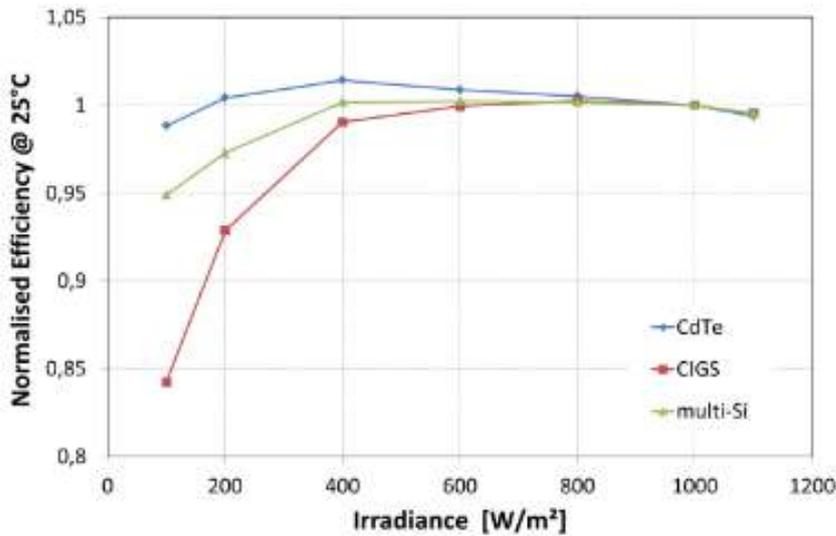


그림 30: 다양한 태양광모듈 유형별 효율곡선.

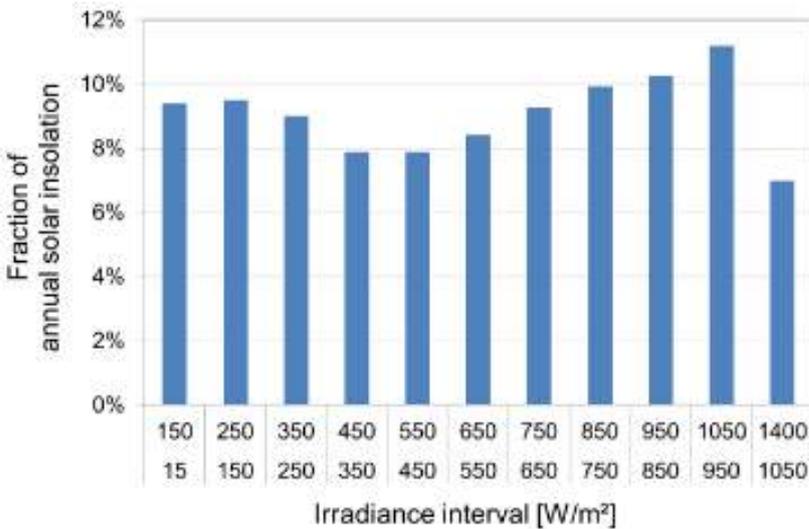


그림 31: 100 W/m² 간격으로 구분한 면내 조사강도 (독일 쾰른).

지역 기후와 관련한 조사강도 영향은 100 W/m² 간격으로 구분한 면내 조사강도의 빈도 분포에 의해 결정된다. 그림 31 은 독일 쾰른에서 측정된 분포 곡선으로, 조사강도는 거의 균등하게 분포되어 있음을 보여준다. 사막 기후에서는 통상적으로 높은 조사강도 쪽으로 크게 이동되는 것을 볼 수 있는데, 이는 낮은 조사강도에서의 모듈 거동이 덜 뚜렷할 것이라는 것을 의미한다.

입사각의 영향

다양한 입사각 하에서의 태양광모듈 성능은 그 각도응답 곡선 혹은 입사각 교정기(IAM)에 의해 설명된다. IAM 은 IEC 61853-2 에 따라 $\pm 85^\circ$ 의 각도 범위에서 측정된다. 곡선은 최적 코사인 거동에 관련된 각도 손실을 설명한다. 그림 32 는 다양한 태양광 유리 유형에 따른 각도 응답을 보여준다. 일반적으로 각도 손실은 입사각이 50° 보다 높을 때 관찰된다. 반사방지 코팅은 각도 성능을 약간 개선한다[102].

태양광모듈의 각도 응답곡선은 10° 간격으로 분류한 조사각도의 각도 분포와 밀접한 연관을 갖는다. 그림 28은 시험 위치인 쾰른에서의 각도 분포를 보여주는데, 이곳에서는 70° 보다 큰 각도 범위에서 약 6 %의 태양에너지가 입사된다.

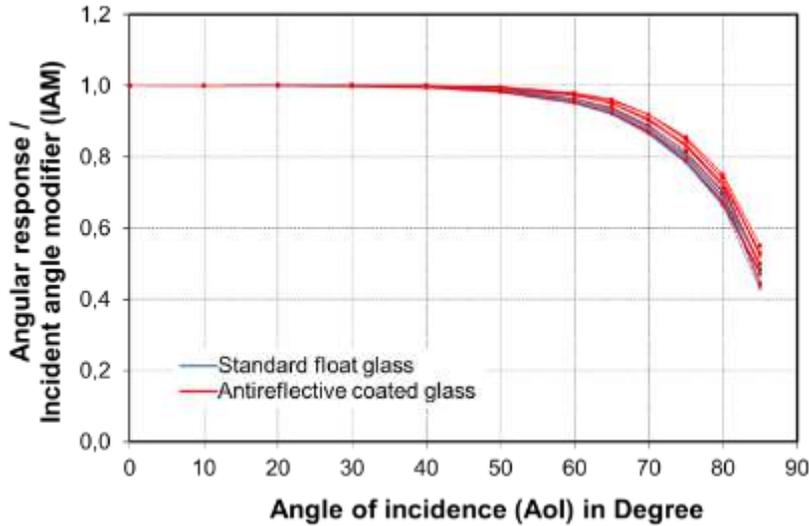


그림 14: 전면 유리의 유형(청색: 표준 유리, 적색: 반사방지 코팅 유리)별 c-Si 태양광모듈의 각도 응답곡선.

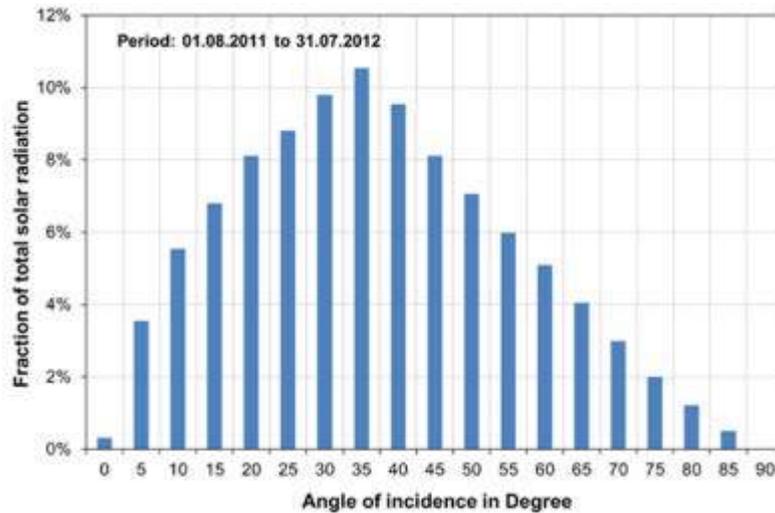


그림 33: 10° 간격의 입사각에서 면내 조사각도의 분류 (위치: 독일 쾰른, 남향 35° 경사면)[10].

유리 유형별 연간 각도 손실의 스프레드는 -1.5~-2.7 % 범위이다[10]

스펙트럼 영향

태양광 스펙트럼은 태양광소자가 흡수하는 입사 조사각도의 일부에 영향을 미친다. 지역적 위치로 인한 구름의 존재, 대기 중 수분과 에어로졸(먼지)의 농도 및 태양의 각도에 의존하는 대기 경로의 길이 변화에 의해 스펙트럼은 하루 중에도 연 중에도 달라진다. 그림 34의 극단적인 사례는 스펙트럼의 변화가 매우 클 수 있음을 보여주는데, 실제로 스펙트럼의 가장 큰 차이는 총 조사각도가 낮고 그에 따른 출력 산출량이 낮아질 때 일어나는데 이는 새벽/해질녘이나 구름이

질을 때이다. 시간경과에 따른 에너지수율에 미치는 스펙트럼 변화의 영향은 총 조사강도와 온도 같은 인자들만큼 크지는 않다.

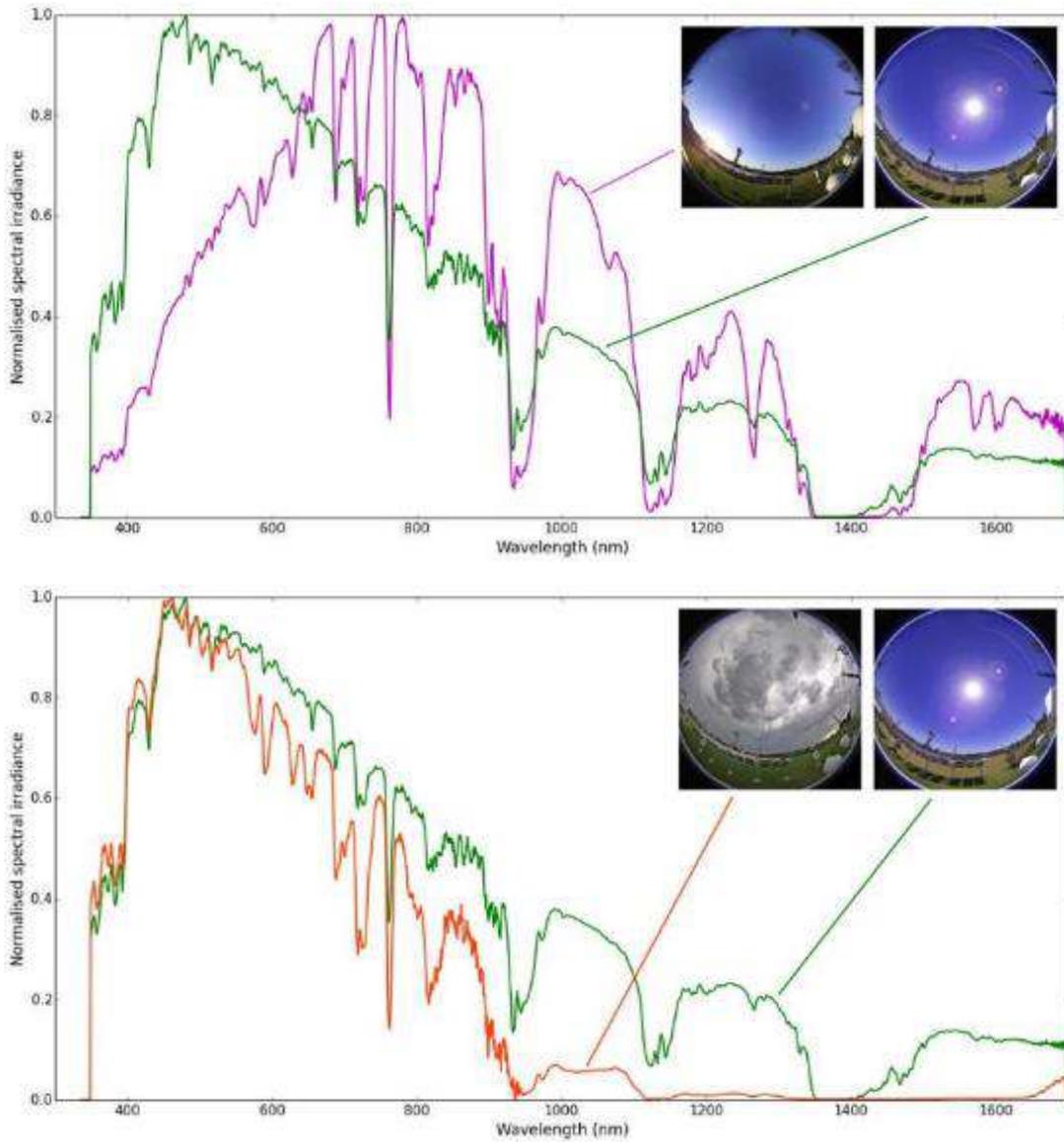


그림 34: 호주 Newcastle 에서 측정된 글로벌 스펙트럼, (위)청명일 한낮과 늦은 오후의 비교. (아래) 한낮 맑을 때와 흐릴 때의 비교. 모든 스펙트럼은 최대값을 동일하게 정규화한 것이다.

순간적 태양광 출력에 미치는 스펙트럼의 영향은 아래 식에 따라 불일치 인자 MM 로 입사 조사강도를 스케일링하는 것과 동일하다.

$$MM = \frac{\int G_{ref}(\lambda) S_R(\lambda) d\lambda \int G_S(\lambda) S_T(\lambda) d\lambda}{\int G_{ref}(\lambda) S_T(\lambda) d\lambda \int G_S(\lambda) S_R(\lambda) d\lambda}$$

여기서 G_{ref} 는 기준 분광조사강도(보통 AM1.5 글로벌 기준[IEC60904-3]), S_R 은 조사강도 센서의 분광응답, G_S 는 측정된 분광조사강도, S_T 는 모듈의 분광응답이다(그림 35 의 예 참조). 고품질

일사량계의 경우, S_R 은 파장에 무관하므로 방정식에서 배제한다. 그리고 분광 보정은 비교적 작기 때문에 출력 산출량은 조사강도와 비례하여 보정할 수 있다고 가정하는 것이 합리적이다.

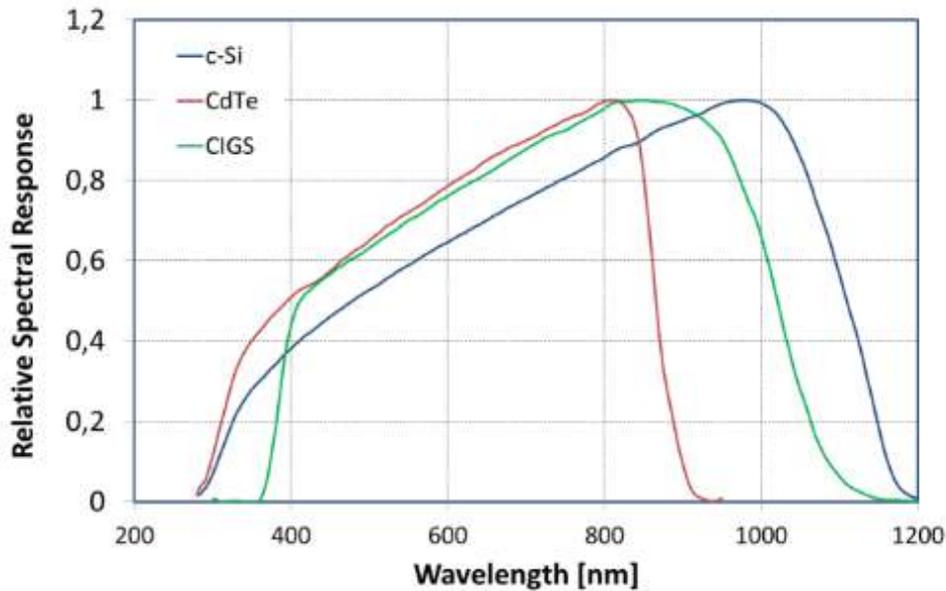


그림 15: 태양광기술별 분광응답.

대안으로는, 분광 불일치 인자를 아래 식에 따라 현장에서 적절한 태양광모듈의 I_{sc} 측정을 통해 합리적으로 추론할 수 있다

$$MM = \frac{I_{sc@meas} \cdot G_{ref}}{G_{meas} \cdot I_{sc@ref}}$$

여기서 G_{meas} 는 측정된 조사강도, $I_{sc@meas,ref}$ 는 각각 측정된 단락전류와 기준 단락전류 값이다.

순간적인 분광 불일치 인자가 유용하긴 하지만, 에너지수율 연구는 우선적으로 주어진 사이트에서의 장기 영향을 다룬다. 시간에 따라 누적된 에너지수율에 미치는 분광 변화의 영향을 정량화하기 위해, Duck 와 Fell[105]은 "분광영향 인자(spectral impact factor: SIF)를 정의하였는데, 이는 특정 기간 동안 관찰된 분광 불일치 인자의 조사강도 가중 평균이다. 예를 들어, 에어매스(AM) 혹은 포톤 평균에너지(APE)와 같은 다른 분광 파라미터들도 이용할 수 있다[106]. 아래에 정의된 SIF는 선형 스케일 인자(linear scale factor)로, 지역의 유효 평균 스펙트럼과 AM1.5 기준 스펙트럼 사이의 차이를 반영하기 위해 측정 혹은 계산된 에너지수율에 적용될 수 있다.

$$SIF = \frac{\sum MM G_i}{\sum G_i}$$

호주에 있는 청명일과 흐린 날이 잘 조합된 33°S 해안 지역에서, 임의의 하루 동안 0.95~1.10 범위의 SIF 값을 관찰하였다. 계절적인 영향에 의해 청명일에 약 ±0.02 범위에서 SIF 값의 변화가

야기되었는데, CdTe 모듈의 경우는 평균 1.01, c-Si 모듈은 0.99, CIGS 모듈은 평균 0.98의 값을 보였다. 흐린 날에는 값이 더 높아지는데, 통상적으로 1.10까지 산발적으로 분포하였다.

7.1.4 경감 인자의 계산

경감(derate) 인자는 7.1.3 절에서 기술한 것과 같이, STC에서의 출력에 대해 개별 손실 요인을 정량화한다.

이런 손실 인자를 계산하는 여러 가지 방법들이 문헌에 소개되어 있다[8,9, 10,105]. IEC 61724-1:2017 규격은 태양광시스템에 대해 기술하고 있는데, 이를 쉽게 단일 태양광모듈에도 적용할 수 있다. 그림 36은 PV-KLIMA 프로젝트의 사례인데, 여기서 경감 인자는 기후별로 다양한 모듈에 대해 계산하였다.

추정한 모듈 성능비(MPR_{Calc})는 5개의 개별 경감 인자를 고려하여 아래 선형 방정식에 따라 계산한 것이다.

$$MPR_{calc} = 1 + \Delta MPR_{TEMP} + \Delta MPR_{LIRR} + \Delta MPR_{MMF} + \Delta MPR_{AOI} + \Delta MPR_{SOIL}$$

선형 성능손실 분석(LPLA)이라 부르는 이 접근방법에서, 옥내에서 측정된 태양광모듈의 특성을 사용하여 기후별로 계산한 손실 항목 ΔMPR 에 해당하는 메커니즘과 측정된 기상 데이터는 서로 분리되어 있다. 전기적으로 안정한 태양광모듈의 MPR에 영향을 미치는 손실 메커니즘은 온도(ΔMPR_{TEMP}), 낮은 조사강도(ΔMPR_{LIRR}), 분광 불일치(ΔMPR_{MMF}), 각도 손실(ΔMPR_{AOI}) 및 오염(ΔMPR_{SOIL})이다.

손실 항목 ΔMPR 의 정의는, 손실은 네거티브 숫자로 확인되고, 이득은 포지티브 숫자로 확인된다는 것을 의미한다. 각 손실 항목은 특정 성능손실 항목의 조사강도 가중 평균으로부터 계산할 수 있다. 다른 기후에서 작동하는 서로 다른 태양광모듈 유형의 경우, 이들 손실 인자들의 양은 크게 다를 수 있다. 계산을 단순화하기 위해 영향 인자들은 서로 독립적이라고 가정한다.

개별 영향들의 합계 역시 설치조건에 따라 크게 달라진다. 최적 설치 장착 조건에서는 결과가 유효하다. 개별 인자의 영향은 설치 장착 조건이 최적이지 않으면 더 커진다. 태양광모듈이 서로 밀접하여 설치되었거나 지붕 일체형인 경우 온도에 의한 손실은 증가한다. 낮은 조사강도의 부분과 그 손실 역시 최적 설치 방향이 아니거나 경사지게 설치되었을 경우 증가한다. 설치 방향이 최적이지 아닐 경우 평균적으로 단파장(blue shift)이 예상될 수 있는데, 이는 계절적인 영향을 더 증가시키게 된다.

옥외측정 출력값과 라벨에 표시된 값과의 편차도 고려하면서, 측정된 MPR과 계산된 MPR_{calc} 사이의 차이를 계산하였다. 시료가 전기적으로 안정할 경우, 결과는 셀 기술과는 무관하다. 비록 이차 영향은 무시할 수 있지만, 측정된 수율 대비하여 이 방법으로 추정된 수율과의 편차는 시험한 60개 모듈 대부분에서 $\pm 3\%$ 이내이다. 편차가 더 심한 것은 기본적으로 안정되지 않은 성능과 대표성이 없는 $P_{max,Outdoor}$ 때문이라는 결론에 이른다. 각 개별 영향 인자들을 분리시키고 그 특성을 최적화함으로써 결과를 더 개선할 수 있을 것이다.

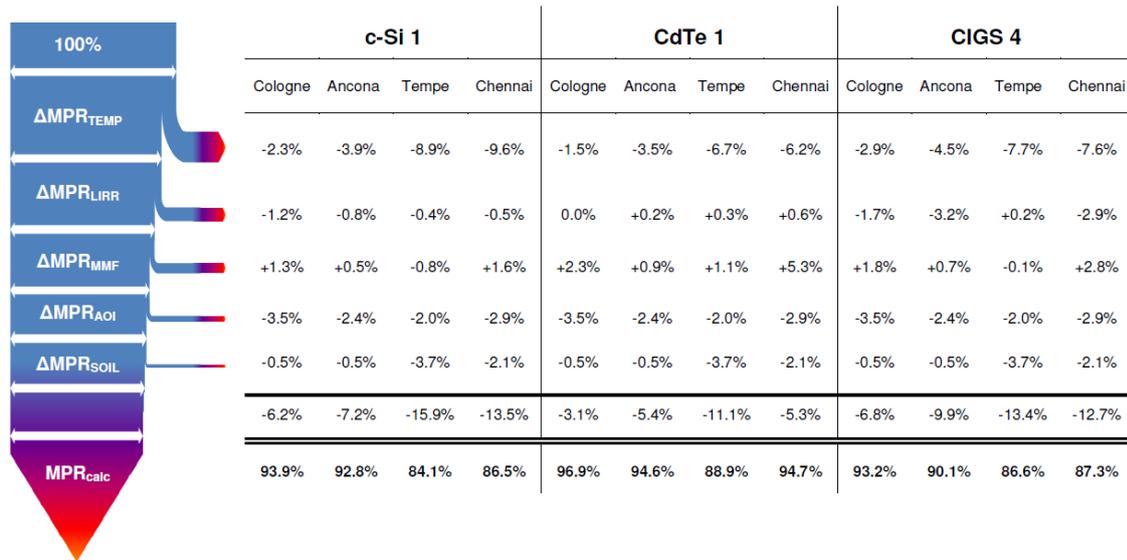


그림 16: 4 개 위치에서 측정된 3 가지 모듈 유형의 선형 성능손실 분석[10].

7.2 기후별 모듈 데이터의 비교

벤치마킹이나 혹은 열화율은 기상과 지역 조건에 따라 크게 달라진다. 그러므로 다른 기후에서의 측정은 기술적 차이를 확인하고 이해를 높이는데 매우 중요하다.

태양광모듈의 에너지수율 성능은 독일이 지원한 PV-KLIMA 프로젝트의 범주에서 광범위하게 연구되었다. 유형이 다른 15 개 태양광모듈 에너지수율의 비교 측정이 3 년의 기간에 걸쳐 5 개 시험위치에서 조사되었다. 각 태양광모듈은 하나의 전자 부하에 연결되고, MPP 데이터는 조사강도(경사면 글로벌, 수평면 글로벌, 수평면 확산, 법선면 직달), 면내 분광 조사강도(파장 300~1600 nm 범위), 주위 온도, 상대습도, 풍속 및 풍향과 함께 기록되었다. 이렇게 얻은 데이터베이스를 사용하여 태양광모듈의 종합적인 성능 손실분석이 이루어졌다. 표 7 은 각 위치에서의 기후조건 범위를 보여준다. 작동조건이 크게 달라짐으로써 태양광모듈의 에너지수율 순위가 사이트에 매우 의존적이 되었다.

표 7: PV-KLIMA 프로젝트 내에서 TÜV Rheinland 가 운영한 에너지수율 시험 위치. 유리/백시트 구조를 가진 표준 c-Si 태양광모듈의 가중 평균 모듈온도가 주어져 있다.

위치	연간 태양 복사량/경사 각도	200 W/m ² 이하 조사강도의 비율	가중 평균 모듈온도 (> 15 W/m ²)	포톤 평균에너지 (APE)	연간 강수량
Cologne (Germany)	1195 kWh/m ² 35°	19 %	30 °C	1,68 eV	774 mm

Ancona (Italy)	1556 kWh/m ² 35°	12 %	34°C	1,67 eV	757 mm
Chennai (South-East India)	1861 kWh/m ² 15°	9 %	45°C	1,71 eV	1197 mm
Tempe (Arizona, USA)	2360 kWh/m ² 33.5°	5 %	46°C	1,68 eV	219 mm
Thuwal (Saudi Arabia)	2342 kWh/m ² 25°	4 %	45°C	1,70 eV	70 mm

다양한 기후조건에서 시험한 다양한 태양광기술에 대한 주요 발견

태양광모듈의 에너지수율 성능은 MPR 값으로 표현하는데, 계절적 영향과 일년 전체에 대한 변화 분석을 위해 통상 월간 단위로 계산한다. 서로 다른 태양광모듈의 에너지수율을 비교하기 위해 연간 MPR 값을 기준으로 하였다. 그림 37 은 에너지수율 비교 결과를 보여준다.

모듈 유형에 따라 최고와 최저 사이에 상당한 차이를 보여주고 있는데, 이는 온도, 조사강도, 분광영향 및 입사각 영향을 조합한 것이다.

- Ancona (지중해): 12%
- Cologne (중간): 14%
- Tempe (매우 건조): 21%
- Chennai (열대): 23%

그림 36 에 나타낸 바와 같이, 시험 위치 사이의 성능 차이는 주로 온도 영향 때문으로 간주할 수 있다. MPR 값의 스프레드는 가중 평균 모듈온도 및 P_{max} 온도계수와 함께 증가한다. MPR 스프레드는 5 %(CdTe1)에서 14 %(CIGS1) 범위이다.

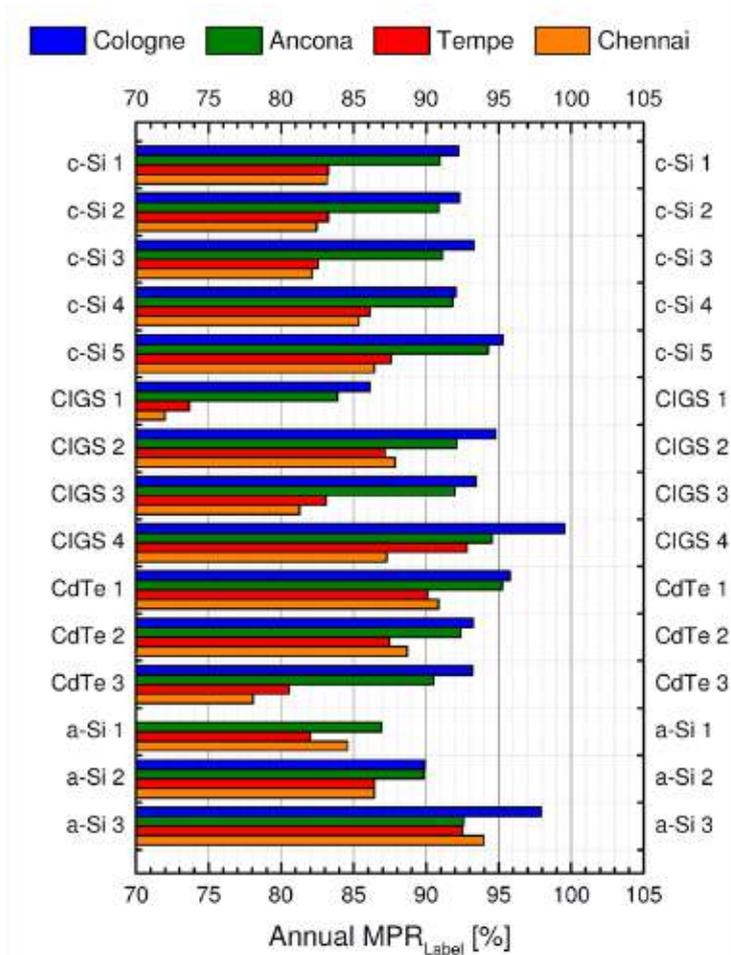


그림 17: 지중해, 중간, 매우 건조 및 열대 기후를 대표하는 4 개 위치에서 측정된 태양광모듈 유형별 MPR 값 [10].

다양한 기후에서 시험한 태양광기술별 성능 수치

기후별로 모듈 데이터를 나타낼 수 있는 또 다른 방법이 이전 IEA Report 에서 소개되었는데[107,108], 이 방법은 IV-곡선을 필요로 한다. 제안된 방법은 위치 별로 측정 기간을 달리하여 많은 수의 모듈들을 비교할 때 특별히 유용하다. 모든 데이터가 일년기간으로 단일 플롯에 포함되는데, 이 방법은 비가역적인 열화나 혹은 열화율 조사 용도의 경우에는 적용할 수 없다.

최대 출력($PR(P_{max})$)과 단락전류($PR(I_{sc})$)의 일간 성능비는 모듈의 성능을 특성 분석할 때 핵심 파라미터로 사용된다. 이 방법의 기본 아이디어는, $PR(I_{sc})$ 로 $PR(P_m)$ 수치들을 정규화시키는 것을 바탕으로 하는 자기 언급(self-referencing) 접근방식이다. 이런 방식으로 조사강도 센서 교정과 분광 영향으로 인한 스프레드를 줄일 수 있고, 조사강도와 온도 의존성을 보다 쉽게 분석할 수 있게 된다. 그림 38 과 그림 39 는 7 개의 다른 위치(노르웨이, 영국, 독일, 미국, 스위스, 프랑스,

사이프러스)에서 측정된 c-Si 와 a-Si 모듈(a-Si, a-Si/ μ -Si, a-Si/a-Si, a-Si/a-Si/a-Si) 에 대한 사례를 보여주고 있다. 정규화시킨 그래프는 각 기술별로 전형적인 조사강도와 온도 의존성을 보여준다.

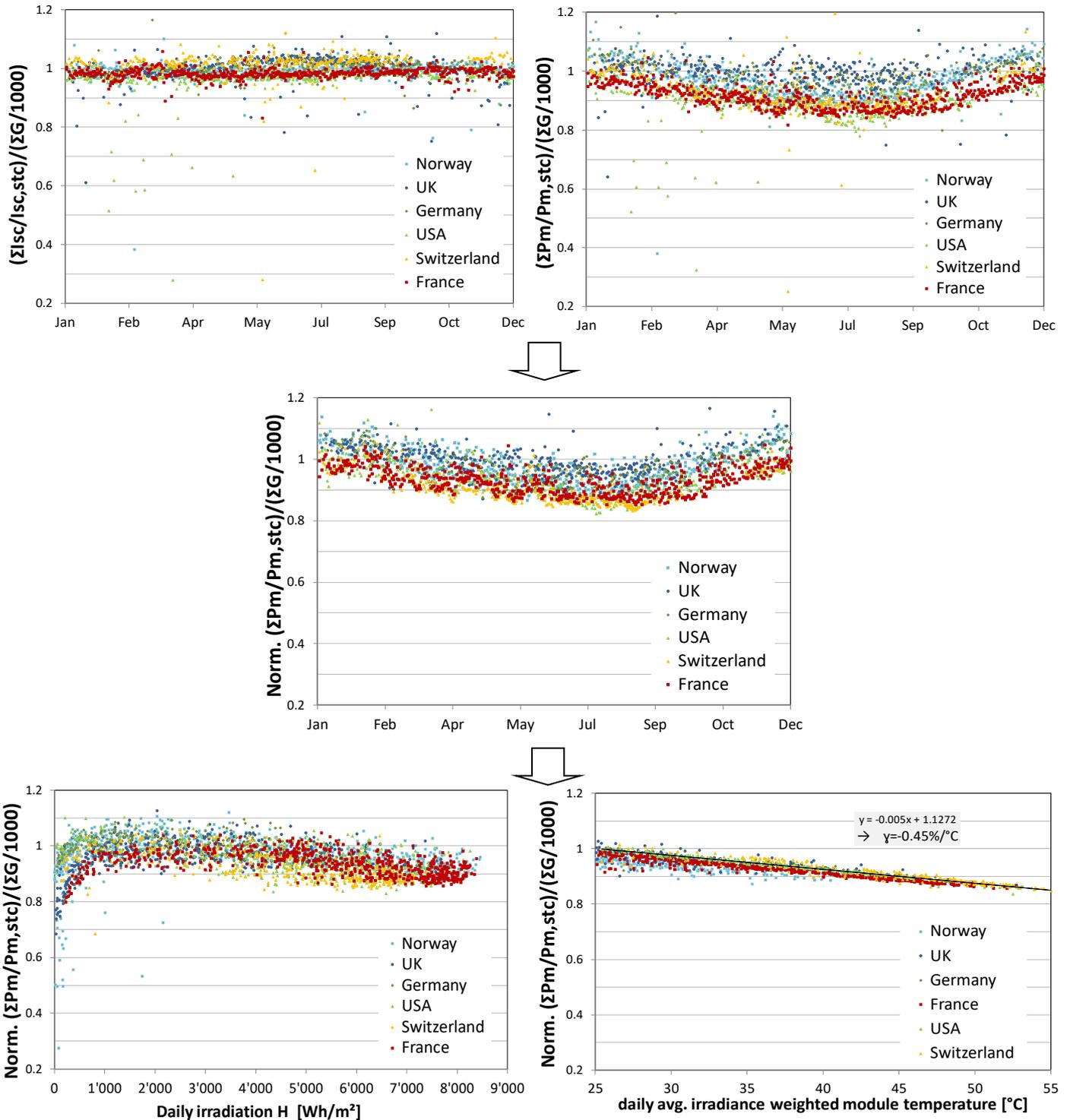


그림 18: 위치 별로 측정된 6 개 c-Si 모듈의 일간 성능비 $PR(P_{max})$ (상단/우)와 $PR(I_{sc})$ 상단/좌) 로 분석한 접근방법의 사례. 스텝 1: 정규화시킨 성능비 기준 $PR(P_m)$ 에 통합. 스텝 2: 일간 조사강도(하단/좌)와 조사강도 가중 평균 모듈온도(하단/우) 의존성에서의 플롯.

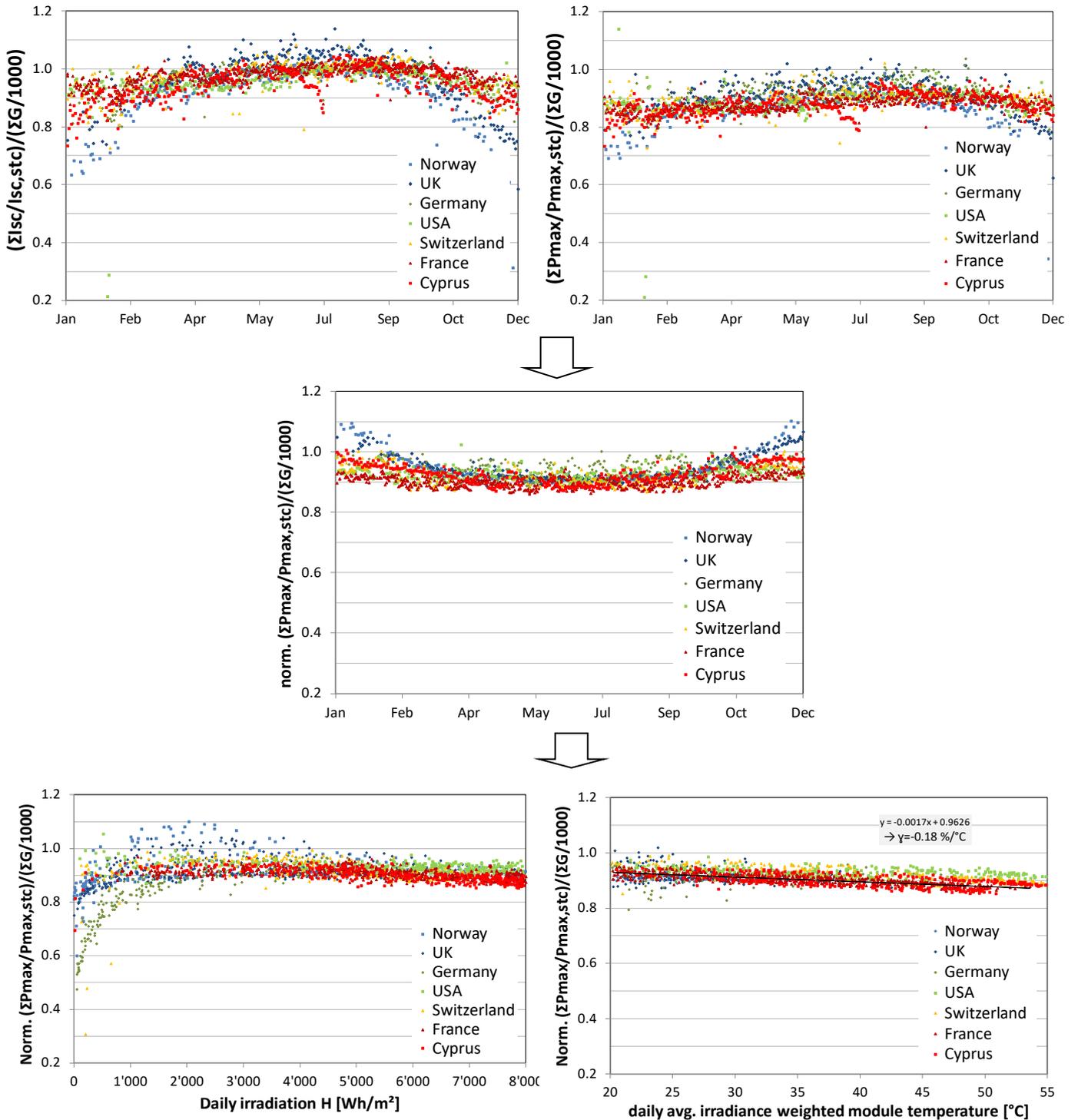


그림 39: 위치 별로 측정된 7개 a-Si 기반 모듈의 일간 성능비 $PR(P_{max})$ (상단/우)와 $PR(I_{sc})$ 상단/좌)로 분석한 접근방법의 사례. 스텝 1: 정규화시킨 성능비 기준 $PR(P_m)$ 에 통합. 스텝 2: 일간 조사강도(하단/좌)와 조사강도 가중 평균 모듈온도(하단/우) 의존성에서의 플롯.

7.3 모듈 성능 손실율

7.3.1 방법론

여기서는, I/V -곡선 혹은 최대 출력값을 측정할 때 태양광모듈의 성능 손실율(performance loss rate: PLR)을 평가하는데 사용되는 방법론의 개요를 소개하고자 한다. 여기 기술한 방법의 일부는 태양광시스템용[109,14,110,111,112,113]으로 개발된 것이지만 모듈 수준에서도 충분히 적용할 수 있다. 수명 기간의 여러 단계에서 태양광모듈의 옥내 특성분석을 통한 PLR의 평가와 관련한 주제는 여기에서 다루지 않는다.

일부 기술, 특히 박막은 소재 자체에서의 안정화 프로세스 때문에 작동 후 처음 몇 달 동안에 현저한 성능 손실을 보여준다. 초기 단계에서 가파른 특징을 보여주는 PLR은 이어서 좀 더 안정된(장기) 성능손실 거동으로 이어진다. 그림 40은 작동 시작 6년 동안 2가지 기술(mc-Si과 a-Si)을 비교한 사례이다. mc-Si 모듈의 경우는 명백하지 않지만 a-Si 모듈에서 일어나는 초기 성능 손실을 강조하기 위해 성능의 초기값을 함께 나타내었다.

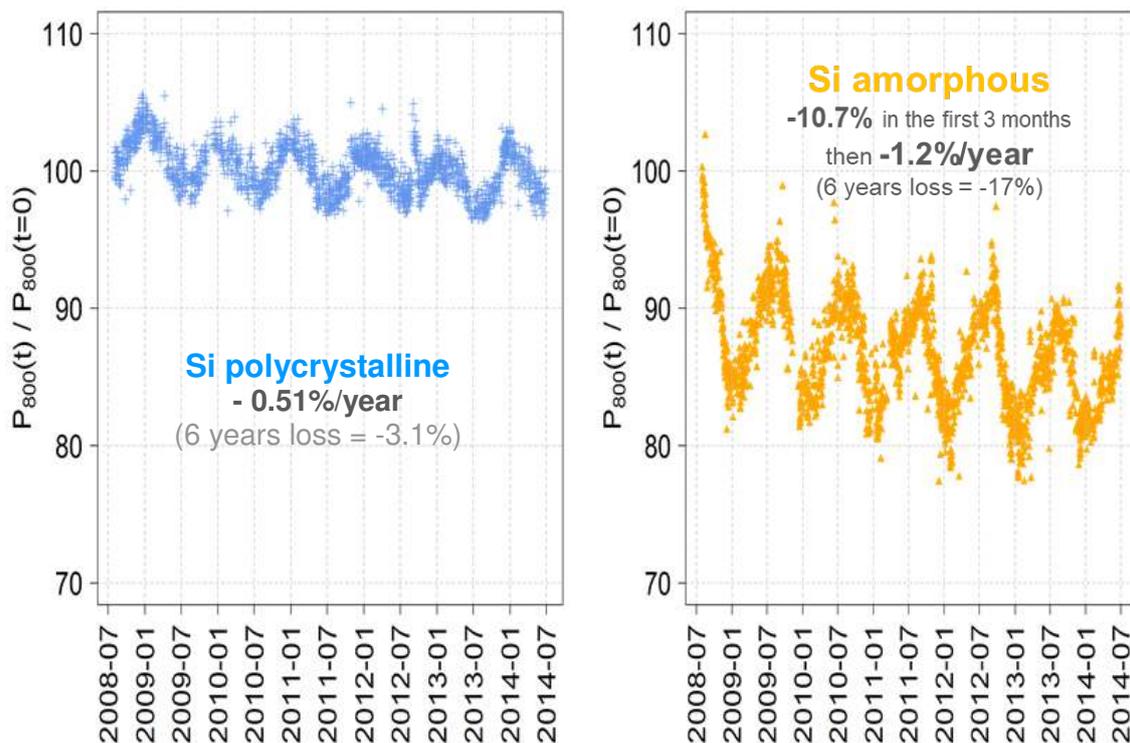


그림 40: INES에서 측정된 작동 시작 후 6년 동안 mc-Si(좌)와 a-Si(우) 모듈의 성능 거동. 적색: 초기 성능. 흑색 점선: 성능 손실의 추이.

여기서 소개한 방법은 초기와 장기 PLR 둘 다를 추출하는 데에도 적용할 수 있다.

PLR의 계산은 시계열 성능 지표로부터 하나의 추이를 추출하는데 있다. 효율적인 측면에서 다음과 같은 문제에 대해 특별한 주의가 필요하다.

- **가용한 데이터의 길이:** 신뢰할만한 PLR의 평가를 위해서는 적어도 3년에서 5년의 시계열 데이터(채택한 방법뿐 아니라 기술에 의존)가 있어야 한다. PLR 계산용으로 가용한 여러 방법의

정확도는 가용한 시계열의 기간과 함께 증가하고, 그리고 여러 방법으로 얻은 결과들은 유사한 값으로 수렴하는 경향이 있다[109,114].

- **계절적 변동과 특이값(outliers):** 여러 방법의 정확도는 태양광모듈/시스템 성능의 연간 변화폭에 의해 크게 부정적인 영향을 받는다. 이는 특히 결정질실리콘 제품의 경우에 그러하다. 이런 이유로, 특이값을 제거하기 위해 적절한 필터링 테크닉을 채택하고, 성능값을 기준 조건(예: STC) 세트에 맞추어 보고하기 위해 보정 테크닉을 채택하고, 그리고 계절적 변동(결정적 평활화(smoothing))을 축소하는데 있어 특별한 주의가 요망된다[110,111,114]. 하나의 대안으로, 계절적 변동의 크기로부터 하나의 추이를 독립적으로 추출하는 통계적인 방법을 적용할 수 있다(통계적 평활화) [112,113,115,116,117].

일반적으로 PLR의 계산은 하나의 성능 지표(metric), 하나 이상의 필터링과 보정 테크닉 및 하나의 통계적 방법을 필요로 한다.

7.3.2 성능 지표

성능 지표는 특정 시간 범위(일, 주, 월, 년) 동안 태양광모듈/시스템의 성능을 기술하는 하나의 지수(index)이다. PLR를 계산하는데 사용되는 가장 흔한 성능 지수는, 모듈/어레이 성능비, 모듈/어레이 PVUSA, MPP에서 모듈/어레이 DC 출력이다. 가능할 경우 이들 지수들은, 조사강도, 모듈온도 및 때때로 스펙트럼 측정을 사용하여 STC에 보정한다.

모듈/어레이 성능비

태양광시스템의 경우, 성능비 PR은 다음과 같이 정의된다[118]:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r}$$

여기서 Y_f 는 최종 수율로 설치된 kW 당 발전된 AC-에너지이고, Y_r 은 기준 수율로 어레이면(POA) 조사강도 G_r 와 STC 조건에서의 조사강도의 비이다.

6.1.1 절에서 이미 기술한 것과 같이 특정 모듈의 PLR을 계산하기 위해 MPR을 사용할 수 있다. 거기에서의 PR은 설치된 kW 당 발전된 DC-에너지를 바탕으로 한 것인데, 여기에서는 Y_f 대신 모듈/어레이 수율 Y_a 로 표시된다.

$$MPR = \frac{Y_a}{Y_r}$$

MPR 방법의 장점은 조사강도에의 정규화이다. 그러나 강한 온도 의존성은 MPR 지표의 강한 계절적 변동에 반영된다.

모듈/어레이 PVUSA

PVUSA (Photovoltaics for Utility Scale Applications) 지표는 1990 년대에 NREL 이 개발한 방법으로[119], 성능시험조건(performance test conditions: PTC, 법선 조사강도 1000 W/m^2 , 주위온도 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 풍속 1 m/s) 하에서 태양광모듈/시스템의 성능을 평가하기 위한 것이었다. 이 방법은 아래 매개변수화 방정식에 따라 MPP (P_{max})에서 측정된 모듈/시스템 출력과 측정된 어레이면 조사강도 (G_r), 풍속 (w) 및 주위온도 (T_{amb}) 사이에 가장 적합한(best-fit) 상관관계를 수행한다.

$$P_{max} = G_i(a + b \cdot G_i + c \cdot w + d \cdot T_{amb})$$

파라미터 a, b, c, d 는 PTC 조건에서의 출력을 추정하는데 사용된다. 이 방법은 모듈/어레이 성능비 방법보다는 훨씬 더 많은 수의 변수를 포함하지만, 특별히 온도와 바람의 냉각 효과를 고려하기 때문에 더 잘 작동될 것으로 예상된다.

MPP에서의 DC-출력

MPP에서의 DC-출력은 가장 간단한 파라미터로, PLR의 계산용으로 사용할 수 있다. 그러나 이는 조사강도, 온도 및 분광효과에 의해 크게 영향을 받는다. 이런 이유로 이 파라미터는 아래에 기술한 것과 같이, 항상 필터링 및 보정 테크닉과 결합하여 사용한다.

7.3.3 필터링과 보정 기법

특이값을 제거하고 성능의 계절적 변동을 약화시킬 수 있는 테크닉의 채택은 결과의 정확도에 크게 영향을 미치는데, 특히 시계열 성능값(다음 절 참조)에 대해 어떤 평활화(smoothing)도 이루어지지 않았을 때 그러하다. 가장 적절한 필터와 보정 세트는 일반화될 수 없고 특정 상황에 따라 달라진다. 예를 들어, 태양광모듈/시스템과 조사강도 센서가 서로 멀리 떨어져 있다면, 두 요소가 서로 다른 조사강도 값을 기록하는 상황(특히 단거리에 장애물이 존재할 때)에 해당하는 성능값은 배제해야 한다[120]. 이를 이행하는 적절한 방법은, 한계값 $\underline{PR} \pm n \cdot \sigma$ 를 초과하는 PR의 순간값을 배제하는 것이다. 여기서 \underline{PR} 은 정의된 기간에서 PR의 평균 혹은 최빈수(mode)이고, σ 는 표준편차, n 은 희망하는 출력이 더 높거나 낮음에 따라 선택한다. 정규(Gaussian) 분포를 따라 값들이 합리적으로 분포되었다면 앞의 조건이 적용될 수 있다. 또 다른 가능한 필터는 선택된 성능 지표(metric)와 관련된다. 예를 들어, 800 W/m² 보다 더 높은 어레이면 조사강도 하에서 계산할 때는 PVUSA 지표가 더 정확하다는 것이 실증되었다[121].

MPP에서 측정된 DC-Power에 적용된 가장 흔한 보정은 조사강도와 온도 영향과 관계된다.

$$P_{corr} = P \cdot \frac{G_{STC}}{G} \cdot \frac{1}{1 + \gamma(T_c - T_{STC})}$$

여기서 γ 는 출력 온도계수(%/°C), G_{STC} 와 T_{STC} 는 STC 조건에서의 조사강도와 모듈온도이다. 측정하지 않을 때 셀 온도는 문헌에 있는 가용한 공식으로 계산할 수 있다[122]. 분광 효과를 반영하기 위해[109], 즉 AM1.5 스펙트럼을 기준으로 한 조사강도 스펙트럼으로 보고하기 위해 추가적인 보정을 적용할 수 있다[124]. 실제, 분광 데이터가 가용할 때(측정된 것이거나 혹은 3.2.4 절에 기술한 것과 같이 시뮬레이션 한 것이거나), 분광 보정은 PLR 추정을 위한 선형 회귀 불확도의 감소에 기여하는데, 그림 41에 보는 바와 같이 결정질실리콘 기술에서 특별히 그러하다. 이 사례에서 PLR은, Bolzano(북동 이탈리아)에 설치된 24개 각기 다른 태양광시스템의 3년 연속 DC-출력을 선형 회귀로 계산한 것이다. 서로 다른 필터링과 보정 테크닉 세트를 적용하여 얻은 선형 회귀의 불확도가 비교되어 있다.

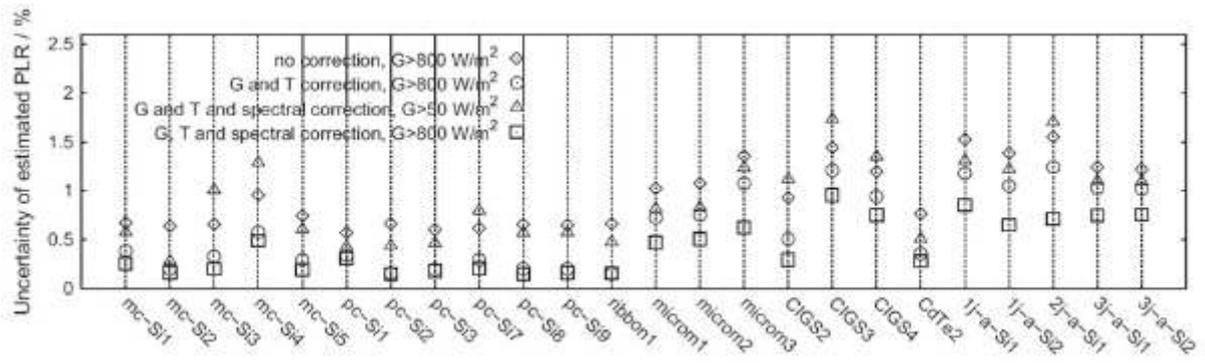


그림 41: 서로 다른 필터링과 보정 테크닉을 사용한, 3년 연속 월간 DC-출력에 대해 선형 회귀를 사용한 PLR 계산에서의 회귀 불확도.

IV-곡선을 옥외에서 측정할 때, STC 조건에서의 주요 파라미터(I_{sc} , V_{oc} , FF 및 P_{max})를 추출하기 위해서는 IEC 60891 규격에 따라 보정을 해야 한다[125]. STC 조건으로 IV-곡선을 보정한 사례는 그림 42 와 같다. 그림 43 은 하나의 기술에 대해 STC-보정한 시계열 IV-곡선 파라미터를 보여준다[13].

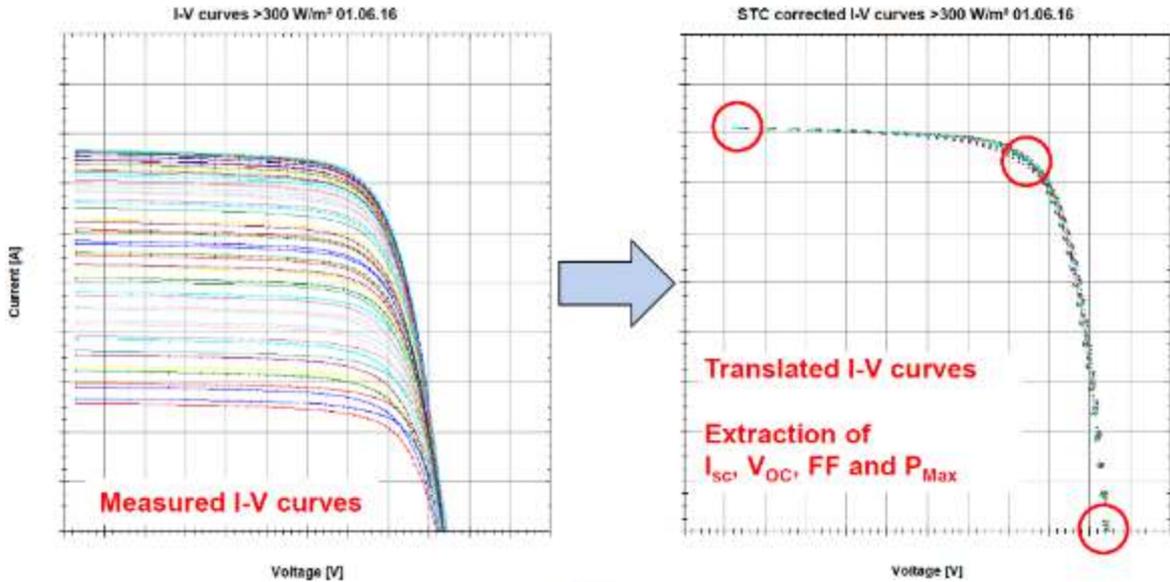


그림 42: IEC 60981 에 따라 측정된 IV-곡선을 STC 조건으로 보정.

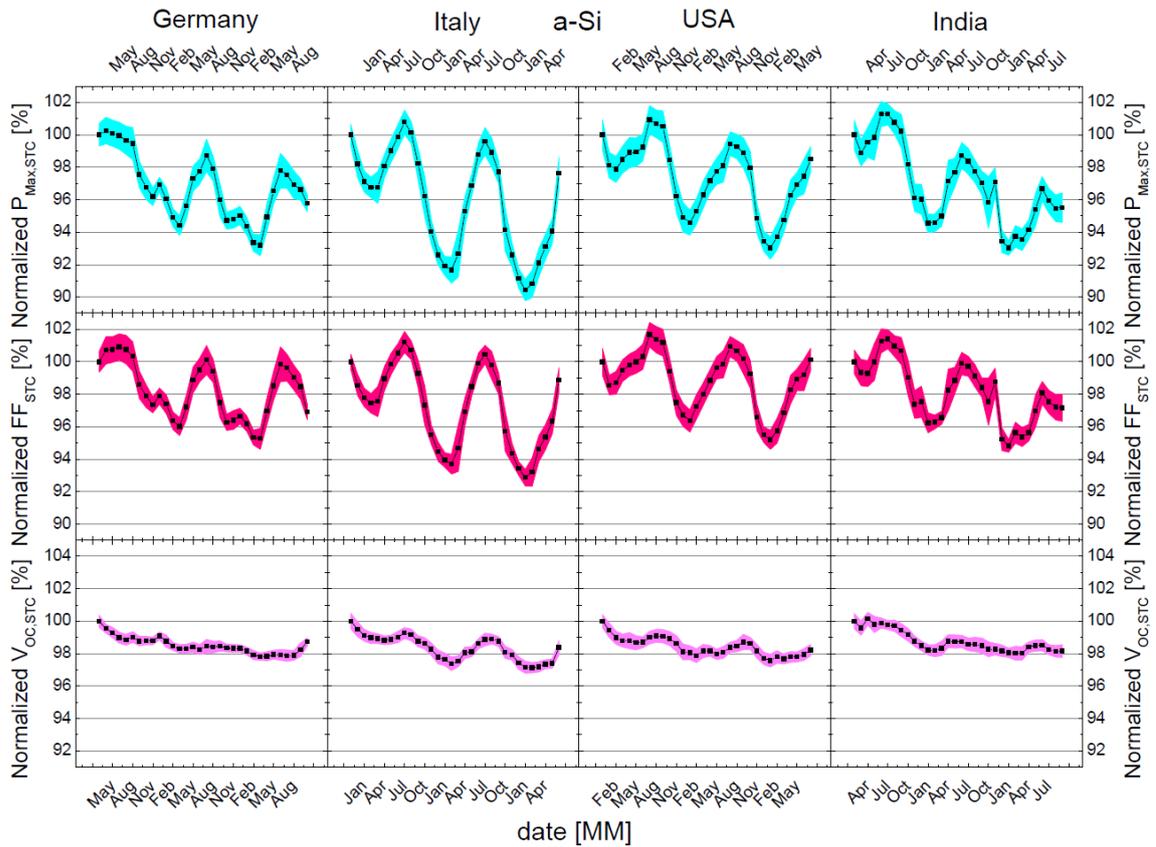


그림 43: IEC 60981 에 따라 STC 조건으로 보정한 일부 시계열 IV-곡선 파라미터(P_{max} , FF , V_{oc}). 표시된 값들은 하나의 a-Si 시료이다.

7.3.4 통계적 기법

일단 일련의 시계열 성능 지수가 가용하면, 하나의 추이를 추출하고 PLR 을 계산하는데 하나 혹은 더 많은 통계적 테크닉이 필요하다. 다음은 문헌에 소개된 것들이다.

- 선형 회귀(linear regression)
- 단순 혹은 이중 주기성 피트(simple- or dual-periodicity fit)
- 고전적 시계열 분해(classical time series decomposition: CSD)
- 논리적 회귀를 사용한 계절적 추이 분해(seasonal trend decomposition) (LOESS)

문헌에서 찾을 수 있는 또 다른 통계적 테크닉은 자기 회귀 이동 평균(autoregressive integrated moving average: ARIMA)이다[123].

선형 회귀

선형 회귀는 성능 지표의 시계열 월간 값을 피팅할 수 있는 가장 간단한 방법이다. 일반적으로 이 테크닉은 모든 시리즈 데이터에 적용할 수 있지만, 일부 경우에는 초기 성능 손실(6개월의 작동 때까지 지속)이 명백하고, 초기와 이어지는 기간에 대해 2개의 다른 선형 회귀를 적용할 수 있다. 선형 회귀는 다음과 같이 표시된다.

$$X = a \cdot t + b$$

여기서, X 는 포괄적인 성능 지표, t 는 시간 범위에서의 누진수(일, 월 등), a 와 b 는 회귀 계수이다. PLR은 다음과 같이 계산한다.

$$PLR = \frac{12 \cdot a}{b}$$

후자는 또한 *상대적인(relative) PLR*로 부르기도 한다. 문헌에서는 또 다른 정의가 사용되는데, 여기서 PLR은 $12 \cdot a$ 로 계산되며, 이는 *절대적인(absolute) PLR*에 해당한다. 그러므로 2가지 정의 중에 어떤 것을 사용하느냐에 따라 특별한 주의가 필요하다. 그 이유는 일부의 경우에는 PLR을 정의하는 공식이 보고되지 않아 오해가 일어날 수 있기 때문이다.

그림 44는 c-Si와 하나의 박막기술을 대상으로 3개의 서로 다른 성능 지표 - 조사강도, 온도 및 분광효과를 보정한 PR, PVUSA, DC-출력 -에 적용된 선형 회귀를 보여준다[109].

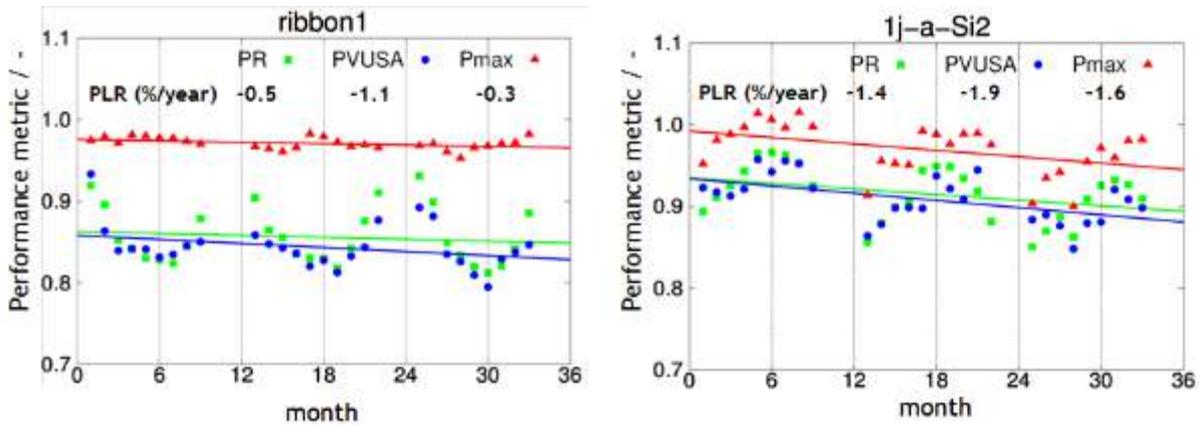


그림 44: 조사강도, 온도 및 분광효과를 STC에 보정한 3년 기간의 시계열 월간 PR, PVUSA, DC-출력의 선형 회귀.

단순 혹은 이중 주기성 피트

시계열 성능 지표를 더 잘 피팅하기 위해, 단순 혹은 이중 주기성 피팅을 적용할 수 있는데, 특히 계절적 변동이 명백하고, 이것에 대한 만족스런 보정결과를 얻지 못할 경우에 그러하다. 아래와 같이 정의되는 선형의 장기 추이를 포함하는 계절 함수에 시계열을 피팅시켰다.

단순 주기성 피트: $X = A_0 \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \tau \right) + at + b$

이중 주기성 피트: $X = A_0 \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \tau_1 \right) + A_1 \sin \left(2\pi \frac{t}{2T} - \tau_2 \right) + at + b$

여기서 X 는 포괄적 성능 지표, A_0 와 A_1 은 계절적 진동, t 시간 변수(일, 월), T 는 각각의 주기성(월간 값의 경우 12, 일간 값의 경우 365.25), τ 는 계절적 거동의 시간 오프셋, a 는 장기 선형 추이, b 는 데이터의 오프셋이다. 계수 a 와 b 는 PLR 계산용 방정식에 결합된다. 단순 혹은 이중 주기성은 그 복잡성에서 다를 뿐 아니라 이중 주기성 피팅이 가을과 봄 사이 거동 차이를 더 잘

잡아내는 점에서도 다르다. 이 아이디어의 가능한 확장은 하나의 선형 감퇴(linear decline)를 가진 Fourier 와 같은 확장이다. 그림 40 (a)와 (b)는 Bolzano 에 있는 4 kWp 시스템의 66 개월 기간 시계열 월간 성능비 값에 대해 두 가지 방법을 적용한 사례이다.

고전적 시계열 분해 (CSD)

고전적 시계열 분해를 위해, 12 개월에 걸쳐 대칭적인 이동 평균을 사용하여 추이를 컴퓨팅한다.

$$X_{mov}(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{12} \sum_{t-6}^{t+5} X(t) + \frac{1}{12} \sum_{t-5}^{t+6} X(t) \right)$$

여기서 X 는 포괄적인 성능 지표, t 는 시간 변수(일 혹은 월)이다.

이 방법은 성능 지표의 값을 보정하기 보다는 수학적으로 평활화하기 때문에 계절적 변동을 감소시킬 수 있다. 이전과 마찬가지로, PLR 을 계산하기 위해 선형 회귀를 평활화된 시계열에 적용한다. 이동 평균은 6 개월만 데이터 내에 들어가므로 나머지의 추이에 대한 정보는 초기와 마지막 6 개월에서는 없다. 그림 40 (c)는 Bolzano 에 있는 4 kWp 시스템의 66 개월 기간 시계열 월간 성능비 값에 대해 두 가지 방법을 적용한 사례이다.

논리적 회귀를 사용한 계절적 추이 분해 (LOESS)

문헌 [126]에 기술된 이 기법은 비선형 관련성을 추정하는데 사용하는 계절적 추이 분해와 LOESS 방법을 결합한다. 이는 앞의 방법과 유사하다고 볼 수 있는데, 추가적인 특징으로 여기서는 시계열에서(CSD 를 사용할 때 빠진 것들)의 처음과 마지막 달에 대해서도 역시 하나의 추이 요소를 찾아내기 위해 다양한 내부 회귀 루프(internal regression loops)를 사용한다. 다른 한편으로 앞의 것보다 훨씬 더 복잡하다. PLR 의 값을 계산하기 위해서는, 앞의 방법과 마찬가지로 선형 회귀를 평활화된 시계열에 적용한다. 그림 45 (d)는 Bolzano 에 있는 4 kWp 시스템의 66 개월 기간 시계열 월간 성능비 값에 대해 이 방법을 적용한 사례를 보여준다.

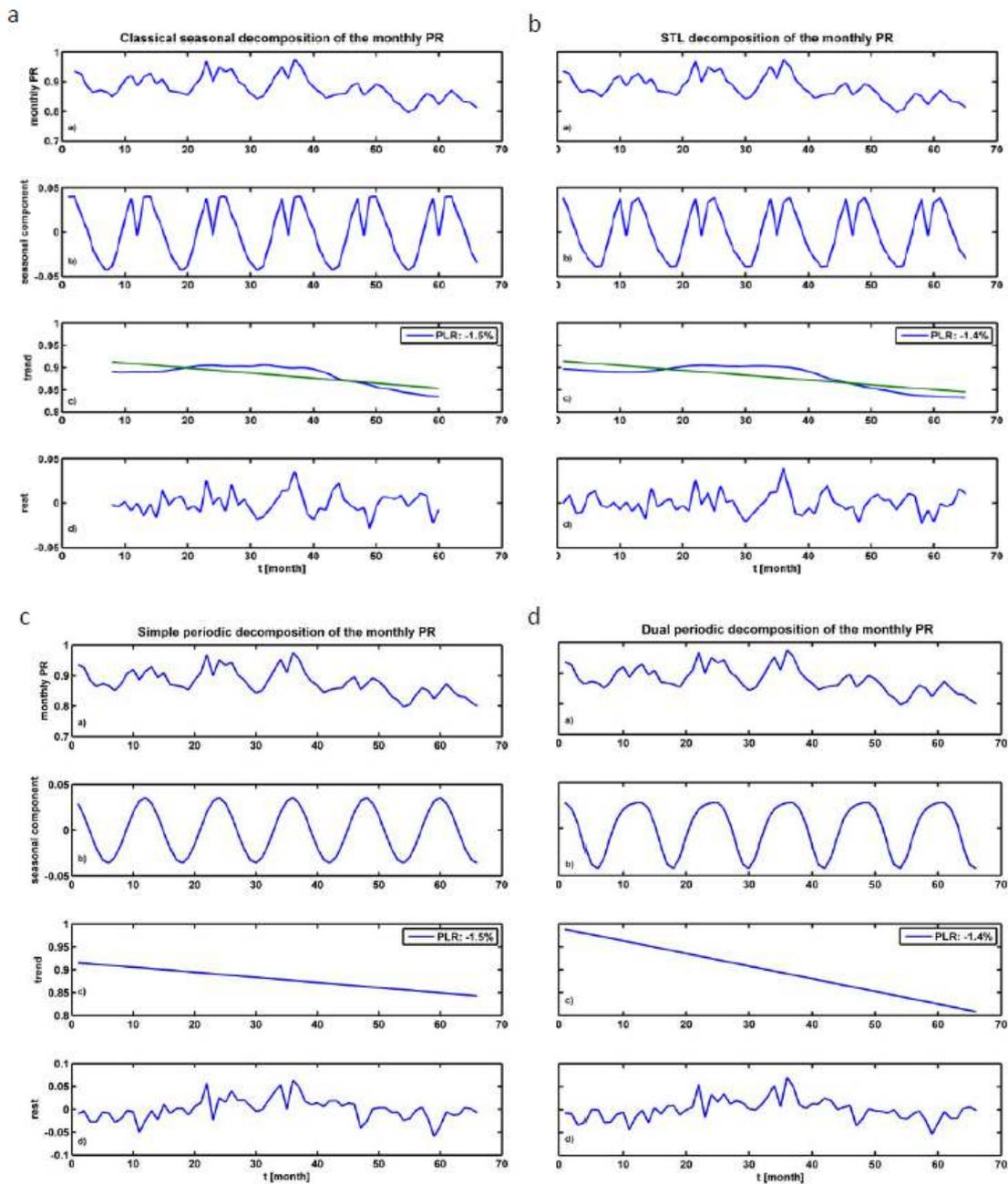


그림 19: Bolzano 에 있는 시스템의 66 개월 성능비 값에 대해 적용된 여러 가지 통계적 테크닉의 사례들. (a) 단순 주기성 피트, (b) 이중 주기성 피트, (c) 고전적 시계열 분해, (d) 논리적 회귀를 사용한 계절적 추이 분해. 각 그림에서, 위로부터: 오리지널 시계열 월간 PR, 계절적 요소, 장기 추이, 나머지.

8 측정 불확도 분석

설문조사는 모듈의 옥외 성능이나 수율 시험에서의 불확도 추정에 대한 통일성과 가용성이 부족함을 강조하였다. 15 개 기관 중 7 개만이 불확도 내용을 신고하고 있다. 6 개 기관은 순간적 출력 측정 P_{max} 의 불확도를 추정하고, 그 6 개 중 5 개 기관은 E, H 및 MPR 총계에 대한 불확도도 보고한다. 한 개 기관을 제외하고 나머지 모든 기관은 그 계산을 GUM 규격에 바탕을 두고 있다[136]. 단지 2 개 기관만이 자체의 접근방법을 공개하였다[31,16]. 신고된 불확도는 에너지(E)의 경우에는 1~2 %, 입사 조사량의 경우는 1.5~4.1 %, MPR 은 4~6 % 범위이다.

8 장에서는 측정 불확도 계산에 적용할 수 있는 일부 일반적인 규칙을 제공하고, P_{stc} , H, E 및 통상적으로 유도한 성능 지표 Y_a , MPR 에 대한 단일 기여 요소를 소개하고자 한다. 태양광시스템 PLR 에서의 불확도를 어떻게 결정하는지에 대한 기술은 Belluardo 의 작업에 제공되어 있고, IEA Report 에 요약되어 있다[27]. 이 방법은 태양광모듈 PLR 계산용 방식과 동일하게 적용할 수 있다.

8.1 서론

7.1.1 절에서 이미 기술한 바와 같이, 에너지 산출량 E 는 측정된 출력을 시간에 걸쳐 적분한 것이다. 통상적으로 유도하는 2 개의 성능 지표는 특정 모듈 수율 Y_a 및 모듈 성능비 MPR 이다.

$$Y_a = \frac{E}{P_{stc}}$$

$$MPR = \frac{E/P_{stc}}{H_i/1000}$$

이들 파라미터는 STC 출력 P_{stc} 와 측정된 입사 조사강도 G_i 를 시간에 걸쳐 적분한 태양 조사량 H_i 의 측정에 의존한다.

P_{stc} 와 대조적으로, E, Y_a 및 MPR 값들은 고유의 것이 아닌데, 이는 모듈 에너지용의 기준 조건이 특별하게 명시된 것이 아니기 때문이다. 이들 값은 모듈과 입사 에너지의 모니터링과 이들 파라미터 측정과 관련 불확도 평가를 필요로 한다. 시험 모듈의 순간적인 출력 생산은 주위온도, 바람조건, 조사강도 스펙트럼 확산 조사강도의 비율, 입사각 및 총 조사강도에 따라 변한다. 날마다 계절적 사이클로 변화하는 이들 작동조건들을 추적하고 기록할 수 있지만 일련의 특정 기준조건에 정규화시킬 수는 없다.

핵심 성능 지표 E, Y_a 및 MPR 에 대한 불확도 분석은 5 장에서 논의한 품질 제어와 유지관리 관행을 따른다고 가정한다. 그렇지 않으면 추가적인 불확도가 포함되어야 한다. 통상적으로 분석은 어떤 준안정성을 무시하고, 시료는 안정된 상태에 있다고 가정한다. 그렇지 않는 경우라면, 특정 에너지수율과 모듈 성능비에 약간 또는 그 이상의 상당한 변화가 일어나게 된다. 비정질실리콘에서 일어나는 광유도 열화와 열 어닐링[98], 결정질실리콘에서의 초기 광유도 열화[137], CdTe 및 CIGS 에서의 다른 준안정성[138,139]이 그 대상이다. 그리고 모든 사이트에서의 모듈 설치 장착은, 특히 지면 위 거리 유지는 정확하게 동일한 방식으로 이루어진다고 가정함으로써 4.1 장의 지침에 따라 열적 및 알베도 차이가 최소화될 수 있다.

적절히 설계된 시험 사이트의 경우, 일출과 일몰 가까이를 제외하고는 모듈에 음영이 없어야 한다. 측정된 조사강도는, 비록 알베도와 음영이 조사강도를 불균일하게 만들더라도 시험 면에서의 평균 조사강도라고 가정한다. 전류-전압 및 최대 출력 측정은 4.2 장의 지침에 따라 이행한다. 그리고 먼지 축적과 열화 같은 파라미터 역시 에너지수율에 영향을 미친다. 이들 작동 파라미터가 Y_a 와 MPR 에 미치는 영향은 분석에서 고려되어야 한다.

8.2 불확도 분석 방법론

측정에서의 불확도 표현을 커버하는 ISO 가이드[136]는 국제적으로 인정된 일련의 문서로, 모든 측정 프로세스에서의 불확도 분석을 규격화하고, ISO 17025 인정을 받은 모든 시험기관들이 이를 따르도록 요구한다. ISO 가이드에 따라 파라미터 X 의 확장 불확도 U 는 다음과 같이 나타낸다.

$$U_X = k \sqrt{\sum \left(\frac{s_i u_i}{k_i}\right)^2}$$

여기서 k 는 포함 인자(coverage factor)이다. 통상적으로 $k=2$ 가 사용되는데, 이는 약 95%의 신뢰 수준을 가진 불확도 간격을 정의한다. 확장 불확도는 Type A와 Type B 불확도가 조합된 것이다. Type A 불확도는 통계적 방법(예: 독립 측정의 표준편차)으로 평가한다. 분광 불일치 인자 같은 일부 불확도 요소는 GUM에 기술된 몬테카를로 방법을 사용하여 평가할 수 있다. Type B 불확도는 여타 모든 오차 요인들을 커버하며 제조업체의 사양서, 교정 결과 및 실험적 혹은 평가 정보를 포함할 수 있다. GUM 증보판 JCGM 101:2008 “측정 데이터의 평가(Evaluation of measurement data) - Supplement 1 “측정에서의 불확도 표시 가이드(Guide to the expression of uncertainty in measurement) – 몬테카를로 방법을 사용한 분포의 전파(Propagation of distributions using a Monte Carlo method)”가 몬테카를로 테크닉을 어떻게 사용하는지 기술하고 있다.

다시 위 방정식과 관련하여, 파라미터 X 의 표준 불확도 요소 u_i 는 포함 인자 k_i 를 가지고 있다. 불확도 요소의 분포는, 만약 표준 편차와 같이 통계적 방법을 사용하여 도출한 것이거나 혹은 포함 인자 2를 사용하는 교정 기관이 제공한 것이라면 통상적으로 정규곡선이다. 확률이 전체 불확도 간격에 대해 동일하면 불확도는 직사각형 분포를 가질 수도 있다. 직사각형 분포의 경우, $k_i = \sqrt{3}$ 이 사용된다. 평가 프로세스를 단순화하기 위해 불확도를 모두 백분율로 표시할 수 있다. 이 접근방법에서는 민감도 s_i 가 통일이 되는데, 그래서 s_i 를 얻기 위해 모든 다른 파라미터에 대해 관심 파라미터의 편미분을 해야 하는 수고를 덜어준다. 온도 혹은 분광 보정과 관련되는 것과 같은 결과물로 표시될 수 없는 불확도 요소는 별도로 취급하고, 그들의 요소는 위 방정식에 있는 다른 불확도 요소와 조합한다.

8.3 단일 불확도 기여 요소들

8.3.1 STC 출력 $U_{P_{stc}}$ 에서의 불확도

STC에서 최대 출력 산출량 P_{stc} 의 불확도를 계산하는 절차는, ISO의 해당 불확도 분석을 준수하는 교정기관들 간의 여러 차례에 걸친 국제 상호비교를 통해 제정되었다[140,141]. 이 불확도는 특정 에너지수율 Y_a 와 모듈 성능비 MPR의 불확도 결정에 사용되기 때문에 매우 중요하다. 조사강도 측정의 불확도와 함께 이는 실제로 그 기여도가 가장 크다.

P_{stc} 에서의 불확도는 교정기관으로부터 받은 모듈 교정에 의해 결정할 수 있다. 이 경우 교정기관은 $U_{P_{stc}}$ 를 95 % 신뢰 한계의 불확도 값으로 인용하는데, 그 값은 통상 $\pm 1.3 \sim \pm 3$ %이다. 만약 $U_{P_{stc}}$ 가 IEC 모듈 적격성 시험을 통과한 모듈의 데이터시트로부터 얻어진 것이라면 일반적인 불확도가 ± 5 %로 좀 더 높다.

만약 연구자가 $U_{P_{stc}}$ 를 평가한다면, 기준 셀 불확도, IV 시스템 측정 불확도, 공간적 불균일, 스펙트럼 오차, 온도 오차, 접촉 오차, 준안정성 오차를 포함한 다양한 요소의 불확도가 포함되어야 한다[146,147,148,149,99,150,151,152,16,26]. 자연 태양광 하의 옥외측정에 비해 옥내에서 솔라 시뮬레이터 하에서 측정될 때 P_{stc} 에 차이가 있을 수 있다. 자연 태양광이 더 선호되는 조건이거나 혹은 NREL, ASU, Sandia 및 ESTI 에서 준수하는 절차와 같이 세심하게 제어된 조건일 수 있는데, 이들 시험기관에서는 조사강도, 온도와 분광 조건을 거의 STC 조건이 되도록 엄격히 제어하고 있다[150,151,153].

8.3.2 조사강도 U_G 와 조사량 U_H 에서의 불확도

조사강도 센서로 측정된 조사강도 G 에서의 불확도 U_G 는, 입사각, 확산 대비 직달의 비, 공기온도, 지면 반사율 및 문헌 [27]에 상세히 논의된 다른 인자들과 관련된 오차 요인들을 포함한다. 기준 셀 혹은 일사량계로 측정된 광대역 조사강도에서의 불확도는 4.3.1 절에서 논의하였으며 여러 그룹들에 의해 평가되었다[154,155,156,157, 158,159]. ASTM 규격 "일사량계와 직달일사량계로 광대역 조사강도의 교정과 현장 측정에서의 불확도 평가 표준 가이드(Standard Guide for Evaluating Uncertainty in Calibration and Field Measurements of Broadband Irradiance with Pyranometers and Pyrhemometers)"[160]은 최신의 일사량계 교정에 ISO GUM 을 적용하는 것에 대한 지침을 제공한다. 주어진 사례는, 데이터를 아침과 오후로 그룹을 짓고, 천정각의 함수로 2 도 폭의 빈으로 만드는 것에 대한 것이다. 이렇게 빈을 만들면, 낮 시간 의존 불확도를 평가하는데 필요한 데이터를 제공하는 것 외에도 어떤 수준측량 오차의 관찰이나 다른 시간대 의존성의 보정을 가능하게 한다. 단일 센서를 사용한 G_i 측정에서의 불확도는 탐지기의 교정 절차에 크게 의존한다. 예를 들어 단일 센서를 분광 보정 없는 열 탐지기를 사용하여 옥내에서 교정할 때는, 95 % 신뢰도를 가진 불확도가 8 %를 초과할 수 있다[161,162,163]. 온도 보정을 한 봉지된 실리콘 탐지기의 경우, 옥외 교정 불확도는 1 %로 낮고[164], 최신 일사량계의 경우는 통상 3 % 정도가 된다[155,154].

95 % 신뢰 구간을 토대로 한, 조사량 H 에서의 불확도는 다음과 같이 계산한다.

$$U_H = 2 \sqrt{\left(\frac{U_G}{2}\right)^2}$$

8.3.3 측정된 최대출력 $U_{P_{max}}$ 에서의 불확도

자연 태양광 하에서 측정된 출력 $U_{P_{max}}$ 의 불확도 추정과 관련된 많은 자료들이 있다 [146,149,99,148,151]. 모듈에 대한 일반적인 불확도 추정은 문헌 [16]에 제공되어 있다. 태양광에너지가 조사강도, 온도, 분광 혹은 입사각 변화를 감안하는 보정이 되지 않으면, E 에서의 불확도는 태양광모듈 출력(U_{mpp})을 측정하기 위해 사용한 장비의 불확도에 의해 지배된다. 이들 불확도는 최대 출력점 트래킹 오차, 용량성 영향, 태양광모듈 2-선 연결시의 저항 손실, 최적이지 아닌 측정 범위 및 이전에 논의한 다른 하드웨어 관련 오차를 포함한다.

95 % 신뢰 구간 P_{max} 의 불확도는 다음과 같이 계산한다.

$$U_{Pmax} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{mpp}}{2}\right)^2}$$

8.3.4 핵심 성능 지수 U_E , U_{Y_a} 및 U_{MPR} 에서의 불확도

핵심 성능 지표 불확도의 결정을 위해서는 시험 시설 전체를 고려하여야 한다. 불균일 영향과 정렬상의 오차도 고려되어야 한다.

첫 번째 어려움은 설치 랙에서의 평균 조사강도 결정에 있는데, 이는 알베도와 인근 음영에 의해 영향을 받는다. 동일한 조사강도에서 균일한 빛에 비해 불균일한 빛에서는 모듈 전류가 감소한다[142]. 이런 조정은, 측정된 에너지에 오차 요소를 추가하는 방식으로 모듈에서의 불확도 분석에 포함시킬 수 있다[143,144,145]. 또한 여러 가지 환기와 통풍 및 열 대류 영향으로 인한 열적 불균일성도 고려되어야 한다. 4 장에서의 권장 사항을 따름으로써, 불균일성(U_U)에 기인한 대부분의 오차는 표 8의 불확도 목록으로 한정시킬 수 있다.

모듈 사이의 정렬 불량뿐 아니라 시험 면과 조사강도 센서 사이의 정렬 불량도 역시 불확도(U_A)에 고려된다.

데이터 포인트 사이의 시간 간격과 포함시키거나 폐기해야 할 포인트의 결정 역시 통합 핵심 성능지표(KPI)의 정확도에 상당한 영향을 미친다[165,166,167]. 데이터 기록 간격과 데이터 가용성에 대한 7.1.1 절의 권장사항이 준수된다고 가정하면, 시간에 대한 출력 적분과 관련되는 오차는 무시할 정도라고 간주할 수 있고 에너지에서의 불확도는 출력에서의 값과 같게 된다. 그렇지 않다면, 적분 시간에 관련된 오차 요인이 추가되어야 한다. 그리고 만약 최대 출력과 조사강도가 같은 시간에 측정되지 않는다면, 빛의 변동폭과 데이터의 동기화에 기인하는 불확도가 MPR U_{MPR} 의 불확도에 추가된다. 이들 시간 관련 2 가지 불확도(U)는 최소화해야 한다.

목록에 있는 모든 기여분을 고려할 때, E , Y_a 및 MPR의 95 % 신뢰 구간 불확도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$U_E = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{Pmax}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_T}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_A}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_U}{2}\right)^2}$$

$$U_{Y_a} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_E}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{Pstc}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_T}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_A}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_U}{2}\right)^2}$$

$$U_{MPR} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{Pstc}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_E}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_H}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_T}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_A}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_U}{2}\right)^2}$$

표 8은 전형적인 값을 가진 단일 불확도의 지배적인 오차 요인들을 요약한 것이다.

이미 논의한 바와 같이 계산된 불확도는 역시 경과시간(time period)의 함수이다. 특정 연도, 달, 일 및 시간 동안의 적분 양은 서로 다른 불확도를 갖는다. 따라서 경과 시간은 불확도 숫자와 함께 항상 명시되어야 한다.

표 8: U_{Pstc} , U_G , U_H , U_{Pmax} , U_E , U_{Ya} , U_{MPR} 에서의 지배적인 오차 요인들. U_{pp} 최대출력점 오차, U_t 시간에 기인하는 오차, U_A 정렬에 기인하는 오차, U_u 균일성에 기인하는 오차.

오차 요인	값	k	코멘트
STC 출력: U_{Pstc}			
모듈 교정	1.3~3%	2	인정 시험기관 정확도
	> 3%	2	옥외 데이터의 STC 보정
데이터시트 값(모듈 교정의 대체)	> 3%	2	제조업체 허용치(측정 불확도 포함)
조사강도/조사량: U_G, U_H			
센서 교정	1.0~5%	2	온도 보정한 분광 일치 기준 셀
	2~8%	2	전형적인 일사량계 교정
교정 드리프트 (%/year)	0.5~1%	2	오염 영향, 센서 교체
모듈 성능: U_{Pmax}, U_E, U_{Ya}, U_{MPR}			
출력, U_{mpp}			
전류/전압 측정	0.05~0.1%	2	데이터 습득 오차
	1%	2	최적이 아닌 측정 범위 선정으로 인한 오차
최대 출력	0.1~1.5%	2	최대 출력점 트래킹에서의 오차, 장비의 온도 오차
예상 이상의 온도 범위 (-10 to 30 °C)	0.0~1.0%	2	22 °C 에서 교정, 더 넓은 범위에서 사용
저항 손실	0~50%	2	2-선 대 4-선 측정
용량성 영향	0~50%	2	모듈 기술과 주사 속도에 의존
시간, U_t			
동기화	0~1%	2	출력과 조사강도의 동시 혹은 별도 측정. 안정된 혹은 변동성 천공 조건
정렬, U_A			
모듈/센서 그리고 모듈/모듈	0~5%	2	평균 입사각에 의존. 60° 입사각에서 0.5 도 정렬 오차는 1.5 %
불확도, U_u			
조사강도	1%	2	단일 모듈, 대면적, 알베도 등
온도	1~4°C	2	단일 모듈, 대면적, 바람, 설치장착 등

8.4 상대 불확도

동일한 조사강도 조건에서 2 개의 모듈을 나란히 측정할 때 MPR 혹은 Y_g 에서의 차이는 각각 ΔMPR 혹은 ΔY_g 로 알려져 있으며 모듈의 벤치마킹용으로 사용된다. 상대적인 측정의 경우, 표 8 에 있는 불확도의 많은 부분은 무시할 수 있다. 특히 조사강도 측정에 따른 가장 높은 기여도를 완전히 무시할 수 있다. 시험 시설의 모듈들은 동일한 하드웨어로 측정되고, STC 출력은 통상적으로 동일한 시험기관에 의해 결정되는데, 솔라 시뮬레이터의 조사강도를 설정하는데 사용되는 기준 셀 교정으로 인한 것과 같은 일부 전형적인 오프셋 오차는 "0"으로 설정될 수 있도록 한다. 이렇게 하면 합성(combined)불확도를 크게 줄일 수 있다.

그림 46 은 불확도가 어떻게 MPR 로부터 ΔMPR 로 변화하는지를 보여주는 하나의 사례이다. 시험 사이트의 불균일성이 다른 측정 불확도에 비해 지배적인 요소가 된다.

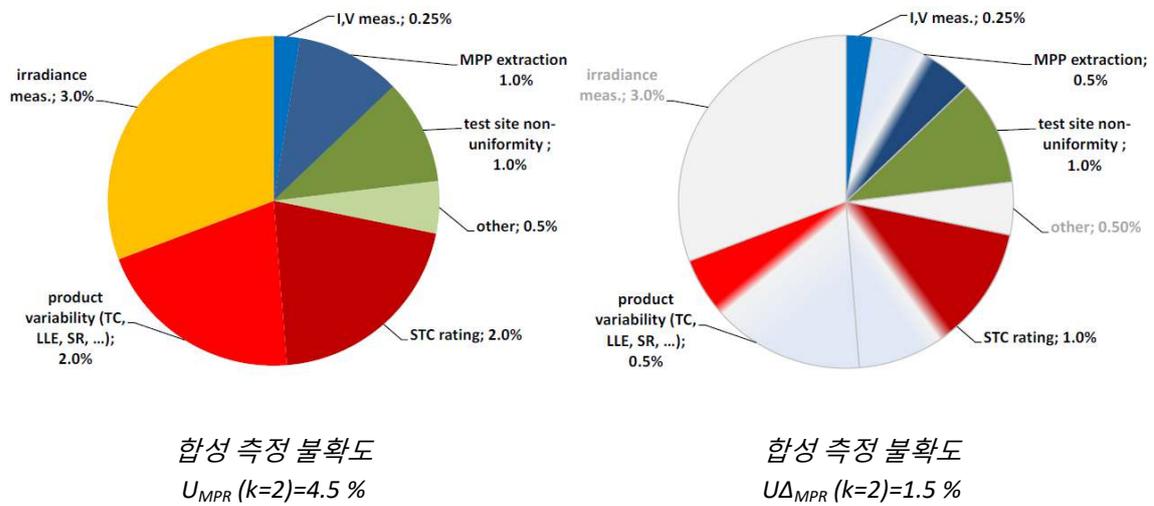


그림 20: MPR 과 ΔMPR 의 합성 측정 불확도에서의 단일 기여 요소들

9 요약과 결론

PVPS Task 13 컨소시엄 내에서 수행한 설문조사는, 아래 항목들의 반복 사용으로 증명된 바와 같이 측정 정확도와 시험 시설의 과학적인 상세 내용이 일반적으로 매우 높다는 것을 강조하고 있다.

- 고정밀 장비 (예: IV 곡선 기반 모니터링, 고정밀 최대 출력점 트랙커, 이차 표준 일사량계, 분광 복사계 등)
- 양호한 측정 관행 (용량성 영향과 같은 주요 아티팩트의 방지, 적절한 샘플링 속도의 사용 등)
- 양호한 품질제어와 유지관리 관행 (예: 품질 마커의 사용, 이메일 경고, 규칙적 교정 등)

그럼에도 불구하고 설문조사는 일부 한계도 드러내 보였는데, 주로 서로 다른 옥외 데이터의 비교가능성 및 이들을 모델의 검증용으로 사용하는 것에 관한 것이다. 그 이유는 데이터를 보고하는 방법에 대한 통일된 합의의 부족 때문이다. 설문조사는 또한 최종 측정 불확도의 추정치 현히 개략적이고 심지어는 일부 누락되어 있다는 것을 보여준다.

주요 비판은 다음의 부족 사항으로 확인되었다.

- 3 개의 주요 성능 지표 E, Ya 및 MPR 에 대한 합성 불확도 결정용 공동 접근방법.
- 임의의 불확도 계산에 고려해야 할 모든 가능한 기여 불확도를 포함하는 기준 목록의 가용성 (예: MPP 트랙킹 정확도, 열적 불균일, 알베도, 모듈 후면과 셀 온도와의 차이 등).
- 벤치마킹 결과에서의 통일성 합의 (시험 절차, 모듈 샘플링 절차, STC 기준 출력의 불확도 등).
- 시험기관 간의 측정 캠페인.

이런 취약점의 주요 이유는 옥외 시험조건의 재현이 자연적으로는 거의 불가능하다는 사실 때문이다. 따라서 옥외측정의 불확도 결정은 STC 에서의 측정보다 훨씬 더 복잡하다. 불확도는 실제로 사이트와 시간 의존적이며 많은 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 추정하기가 어렵고 문헌에서도 기술된 것이 드물다.

보다 정확한 STC 성능 데이터의 확보에 대한 압박 때문에 과거에는 STC 측정의 비교가능성을 개선하기 위한 국제적인 수준에서의 협업에 많은 노력을 기울였는데 현재는 인정받은 시험기관 내에서의 비교가능성이 $\pm 1\%$ 이하로 내려오게 되었다. 이는 주로 다음 항목의 준수에 따라 성취된 것이다.

- 단일 불확도 기여에 대한 노하우의 공유.
- 불확도 계산 방법의 상호 조화.
- 신고한 불확도에서의 주요 신뢰도를 평가하기 위한 블라인드 라운드 로빈 이행.

에너지수율 측정의 비교가능성을 향상시키기 위한 첫 번째 스텝은 주요 불확도에 대해 동의를 하고, 측정 불확도를 보고하는 공동의 접근방법을 제안하는 것이다. 두 번째는 진도를 평가하기

의해 시험기관들에 기준 모듈을 돌리는 것이다. 허용 가능한 기간에 신뢰할만한 결과를 얻기 위해서는 실행 가능한 해결책이 확인되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] “Technical Guidelines on Long-term Photovoltaic Module Outdoor Tests”, Reference TG 100-01, European Distributed Energy Resources Laboratories DERlab e.V., pp. 1–16, 2012.
- [2] “IEC 61724-1 Ed.1.0: Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring”, 2017.
- [3] “IEC 61853-1 Ed. 1: Photovoltaic module performance testing and energy rating – Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating”, 2011.
- [4] “IEC 61853-2 Ed. 1: Photovoltaic module performance testing and energy rating – Part 2: Spectral responsivity, incidence angle and module operating temperature measurements”, 2016.
- [5] “CDV IEC 61853-3: Photovoltaic module performance testing and energy rating – Part 3: Energy Rating of PV Modules”, 2017.
- [6] “CDV IEC 61853-4: Photovoltaic module performance testing and energy rating – Part 3: Standard reference climatic profiles”, 2017.
- [7] SolarPower Europe, “Global Market Outlook 2017-2021”.
- [8] G. Friesen et al., “A 4 year energy yield inter-comparison of thin-film modules: linking indoor to outdoor performance data”, 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Kyoto, 2014.
- [9] A. Virtuani und L. Fanni, „Seasonal power fluctuations of amorphous silicon thin-film solar modules: Distinguishing between different contributions“, Prog. Photovolt: Res. Appl., vol. 22, no. 2, pp. 208–217, 2014.
- [10] M. Schweiger, W. Herrmann, A. Gerber, U. Rau; “Understanding the energy yield of photovoltaic modules in different climates by linear performance loss analysis of the module performance ratio”, IET 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0682
- [11] J. Wirth, K. Scharmach, K. Weiß, and M. Köhl, “Stabilization Processes and Air Mass Influences for Outdoor Exposure of Thin Film Modules”, Proceedings of SPIE 8110, 2011.
- [12] T. Ishii, A. Masuda, “Annual degradation rates of recent crystalline silicon photovoltaic modules”, Prog. Photovolt: Res. Appl., 25:953–967, 2017.
- [13] M. Schweiger, J. Bonilla, W. Herrmann, A. Gerber and U. Rau, “Performance stability of photovoltaic modules in different climates”, Prog. Photovolt: Res. Appl., 2017.
- [14] G. Makrides, B. Zinsser, M. Schubert and G. Georghiou, „Performance loss rate of twelve photovoltaic technologies under field conditions using statistical techniques“, Solar Energy, vol. 103, pp. 28–42, 2014.
- [15] M. Koehl, M. Heck, “Load evaluation of PV-modules for outdoor weathering under extreme climatic conditions”, 4th European Weathering Symposium, 2009.

- [16] W. Marion et al., "User's Manual for Data for Validating Models for PV Module Performance", Technical Report NREL/TP-5200-61610, April 2014.
- [17] J. Stein, J. Sutterlueti, S. Ransome, C. W. Hansen and B. H. King, „Outdoor PV Performance Evaluation of Three Different Models: Single-diode, SAPM and Loss Factor Model”, 28th EU PVSEC, 2013.
- [18] S. Sellner, S., J. Sutterlueti, et al. "Advanced PV module performance characterization and validation using the novel Loss Factors Model", 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 2938-2943, 2012.
- [19] B.H. King, C.W. Hansen, D. Riley, C.D. Robinson and L. Pratt, "Procedure to determine coefficients for the Sandia array performance model (SAPM)", SANDIA REPORT, SAND2016-5284, 2016.
- [20] C. Hansen, "Estimating Parameters for the PVsyst Version 6 Photovoltaic Module Performance Model," SANDIA REPORT, SAND2015-8598, 2015.
- [21] G. Tamizhmani, K. Paghasian, J. Kuitche, M.G. Vemula, G. Sivasubramanian, "Photovoltaic Module Power Rating per IEC 61853-1 Standard. A Study Under Natural Sunlight", Solar America Board for Codes and Standards Report, Arizona State University Photovoltaic Reliability Laboratory (PRL), March 2011.
- [22] C. Schill, S. Brachmann, M. Koehl, "Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules", Solar Energy 112, 259–262, 2015.
- [23] B. Herteleer, H. Goverde, F. Catthoor, J. Driesen, J. Cappelle, "Spatial and Temporal Photovoltaic Module Temperature Variations in Outdoor Conditions", 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Kyoto, 2014.
- [24] H. Goverde, G. Van den Broeck, D. Anagnostos, B. Herteleer, J. Govaerts, D. Goossens, E. Voroshazi, K. Baert, F. Catthoor, J. Driesen, J. Poortmans, "Impact of wind on intra-module energy yield variations", 32nd EU PVSEC, München, 2016.
- [25] B. Herteleer, B. Huyck, F. Catthoor, J. Driesen, J. Cappelle, "Normalised Efficiency of Photovoltaic Systems: Going beyond the Performance Ratio", Solar Energy, Volume 157, page 408-418, 2017.
- [26] D. Dirnberger, B. Müller, Ch. Reise, "PV module energy rating: opportunities and limitations", Prog. Photovolt: Res. Appl., 2015.
- [27] Ch. Reise, B. Farnung et al., "Uncertainties in PV System Yield Predictions and Assessments", Report IEA-PVPS T13-12:2017.
- [28] M.V. Blagovest, "Uncertainty considerations in photovoltaic measurements", Doctoral Thesis, <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/23251>, 2016.
- [29] Robert P. Kenny, Davide Viganó, Elena Salis, Giorgio Bardizza, Matthew Norton, Harald Müllejans and Willem Zaaiman, "Power rating of photovoltaic modules including validation of procedures to implement IEC 61853-1 on solar simulators and under natural sunlight", Prog. Photovolt: Res. Appl., vol. 21, Issue 6, pp. 1384–1399, September 2013.

- [30] Compiled by partners in the Performance FP6 Integrated Project, "Guideline for PV power measurement in industry", AITEUR 24359 EN, JRC Scientific and Technical Reports, 2010.
- [31] S. Dittmann et al., "Energy yield measurements at SUPSI - importance of data quality control and its influence on kWh/Wp inter-comparisons", 26th EPVSEC, Hamburg, September 2011.
- [32] R. Gottschalg, T.R. Betts, "Robustness of energy yield measurements of photovoltaic modules", 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2011.
- [33] S. Hegedus, "Review of photovoltaic module energy yield (kWh/kW): comparison of crystalline Si and thin film technologies", WIREs Energy Environ, 2012.
- [34] KS. Astawa, T.R. Betts TR, R. Gottschalg, "The influence of exposure history on Amorphous Silicon properties under realistic operating conditions", Proceedings of the 5th Photovoltaic Science, Application and Technology Conference, pp. 209–213, 2009.
- [35] E. Duran, M. Piliouline, M. Sidrach-de-cardone, J. Galàn, J.M. Andujar, "Different methods to obtain the I - V curve of PV modules: A review," Proc. of the 33rd IEEE PVSC, May 2008.
- [36] A. Driesse, W. Zaaiman, D. Riley, N. Taylor, and J.S. Stein, "Indoor and Outdoor Evaluation of Global Irradiance Sensors", 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2015.
- [37] <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/effective-irradiance/>
- [38] M. Gostein, J.R. Caron, and B. Littmann, "Evaluation of a CdTe Spectrally Matched c-Si PV Reference Cell for Outdoor Applications", Proceedings of the 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2014.
- [39] C.R. Osterwald, M. Campanelli, T. Moriarty, K.A. Emery, and R. Williams, "Temperature-Dependent Spectral Mismatch Corrections", IEEE Journal of Photovoltaics 5(6), pp. 1692–1697, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2459914, 2015.
- [40] "WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation", WMO No. 8. 7th edition. Geneva, Switzerland, 2008.
- [41] C. Reise, B. Müller, D. Moser, G. Belluardo, P. Ingenhoven, A. Driesse, G. Razongles, M. Richter, "Uncertainties in PV System Yield Predictions and Assessments", Report IEA-PVPS T13-12:2017, ISBN 978-3-906042-51-0, 2017.
- [42] Kipp & Zonen, "CM121 Shadow Ring Instruction Manual, version 0706", 2007.
- [43] L.J.B. McArthur, "Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Operations Manual", Version 2.1. WCRP-121, WMO/TD-No. 1274, 2005.
- [44] M. Sengupta et al, "Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications", NREL/TP-5D00-63112. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2015.
- [45] B. Herteleer, H. Goverde, F. Catthoor, J. Driesen, and J. Cappelle, "Spatial and Temporal Photovoltaic Module Temperature Variations in Outdoor Conditions", in 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2014.

- [46] D. King, W. Boyson, and J. Kratochvill, "Photovoltaic Array Performance Model", SANDIA REPORT SAND2004-3535, Sandia National Laboratories.
- [47] S. Krauter and A. Preiss, "Comparison of module temperature measurement methods", in Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 333–338, 2009.
- [48] M. Jankovec and M. Topic, "Intercomparison of Temperature Sensors for Outdoor Monitoring of Photovoltaic Modules", *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 135, no. 3, p. 031012, 2013.
- [49] M. A. M. Bohórquez, J. M. Enrique Gómez, and J. M. Andújar Márquez, "A new and inexpensive temperature-measuring system: Application to photovoltaic solar facilities", *Solar energy*, vol. 83, no. 6, pp. 883–890, 2009.
- [50] B. Herteleer, B. Morel, B. Huyck, J. Cappelle, R. Appels, B. Lefevre, F. Catthoor, and J. Driesen, "High Frequency Outdoor Measurements of Photovoltaic Modules Using an Innovative Measurement Set-Up", in 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 2700–2706, 2014.
- [51] M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K. A. Berger, K. Kato, T. Friesen, H. Liu, and M. V. Iseghem, "Review of Failures of Photovoltaic Modules", 2014.
- [52] R. Moreton Villagra, E. Lorenzo Pigueiras, J. Leloux, and J. M. Carrillo Salinas, "Dealing in practice with hot-spots", in 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 2722–2727, 2014.
- [53] P. N. Botsaris and J. A. Tsanakas, "Infrared thermography as an estimator technique of a photovoltaic module performance via operating temperature measurements", in Proceedings of the 10th ECNDT Conference, 2010.
- [54] M. Alonso-Abella, F. Chenlo, G. Nofuentes und M. Torres-Ramirez, "Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites", *Energy*, vol. 67, pp. 435–443, 2014.
- [55] A. M. G. Amillo, T. Huld, P. Vourlioti, R. Müller und M. Norton, „Application of satellite-based spectrally-resolved solar radiation data to PV performance studies“, *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 3455–3488, 2015.
- [56] T. Behrendt, J. Kuehnert, A. Hammer, E. Lorenz, J. Betcke und D. Heinemann, „Solar spectral irradiance derived from satellite data: A tool to improve thin film PV performance estimations?“, *Sol. Energy*, vol. 98, pp. 100-110, 2013.
- [57] D. Dirnberger, G. Blackburn, B. Müller und C. Reise, „On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies“, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, vol. 132, pp. 431-442, 2015.
- [58] T. Ishii, K. Otani und T. Takashima, „Effects of solar spectrum and module temperature on outdoor performance of photovoltaic modules in round-robin measurements in Japan“, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 19, no. 2, pp. 141–148, 2011.
- [59] T. Ishii, K. Otani, A. Itagaki und K. Utsunomiya, „A simplified methodology for estimating solar spectral influence on photovoltaic energy yield using average photon energy“, *Energy Sci Eng*, vol. 1, no. 1, pp. 18–26, 2013.

- [60] N. Martín und J. M. Ruiz, „A new method for the spectral characterisation of PV modules“, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 7, no. 4, pp. 299–310, 1999.
- [61] M. Schweiger, M. Ulrich, I. Nixdorf, L. Rimmelspacher, U. Jahn und W. Herrmann, „Spectral analysis of various thin-film modules using high precision spectral response data and solar spectral irradiance data“, in *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Frankfurt, Germany, 2012.
- [62] M. Pierro, F. Bucci und C. Cornaro, „Full characterization of photovoltaic modules in real operating conditions: Theoretical model, measurement method and results“, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 23, no. 4, pp. 443–461, 2015.
- [63] „Spectrometer Knowledge-Part 3a: The detector“, BW Tek, 2016.
- [64] R. L. McKenzie, M. Kotkamp, G. Seckmeyer, R. Erb, C. R. Roy, H. P. Gies and S. J. Toomey, „First southern hemisphere intercomparison of measured solar UV spectra“, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 20, no. 20, pp. 2223–2226, 1993.
- [65] G. Seckmeyer, S. Thiel, M. Blumthaler, P. Fabian, S. Gerber, A. Gugg-Helminger, D.-P. Häder, M. Huber, C. Kettner, U. Köhler, P. Köpke, H. Maier, J. Schäfer, P. Suppan, E. Tamm and E. Thomalla, „Intercomparison of spectral-UV-radiation measurement systems“, *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 33, pp. 7805, 1994.
- [66] G. Seckmeyer, B. Mayer, G. Bernhard, R. L. McKenzie, P. V. Johnston, M. Kotkamp, C. R. Booth, T. Lucas, T. Mestechkina, C. R. Roy, H. P. Gies and D. Tomlinson, „Geographical differences in the UV measured by intercompared spectroradiometers“, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 22, no. 14, pp. 1889–1892, 1995.
- [67] A. Thompson, E. A. Early, J. DeLuisi, P. Disterhoft, D. Wardle, J. Kerr, J. Rives, Y. Sun, T. Lucas, T. Mestechkina and P. J. Neale, „The 1994 North American interagency intercomparison of ultra-violet monitoring spectroradiometers“, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 102, pp. 279–322, 1997.
- [68] A. F. Bais, B. G. Gardiner, H. Slaper, M. Blumthaler, G. Bernhard, R. McKenzie, A. Webb, G. Seckmeyer, B. Kjeldstad, T. Koskela, P. J. Kirsch, J. Gröbner, J. B. Kerr, S. Kazadzis, K. Leszczynski, D. Wardle, W. Josefsson, C. Brogniez, D. Gillotay, H. Reinen, P. Weihs, T. Svenoe, P. Eriksen, F. Kuik and A. Redondas, „SUSPEN intercomparison of ultraviolet spectroradiometers“, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 106, pp. 12509–12525, 2001.
- [69] K. Lantz, P. Disterhoft, E. Early, A. Thompson, J. DeLuisi, P. Kiedron, L. Harrison, J. Berndt, W. Mou, T. Erhamjian, L. Cabausua, J. Robertson, D. Hayes, J. Slusser, D. Bigelow, G. Janson, A. Beaubian and M. Beaubian, „The 1997 North American interagency intercomparison of ultraviolet spectroradiometers including narrowband filter radiometers“, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 107, pp. 19–62, 2002.
- [70] A. Bais, M. Blumthaler, A. Webb, G. Seckmeyer, S. Thiel, S. Kazadzis, A. Redondas, R. Kift, N. Kouremeti, B. Schallhart, R. Schmitt, D. Pisulla, J. P. Diaz, O. Garcia, A. M. Diaz Rodriguez and A. Smedley, „Intercomparison of solar UV direct irradiance spectral measurements at Izaña in June 2005“, in *SPIE*, 2005.
- [71] M. Blumthaler, B. Schallhart, M. Schwarzmann, R. McKenzie, P. Johnston, M. Kotkamp and H. Shiona, „Spectral UV measurements of global irradiance, solar radiance, and actinic flux

in New Zealand: Intercomparison between instruments and model calculations“, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 25, no. 6, pp. 945–958, 2008.

- [72] P. Gies, R. Hooke, R. McKenzie, J. O’Hagan, S. Henderson, A. Pearson, M. Khazova, J. Javorniczky, K. King, M. Tully, M. Kotkamp, B. Forgan and S. Rhodes, „International intercomparison of solar UVR spectral measurement systems in Melbourne in 2013“, *Photochem. Photobiol.*, vol. 91, no. 5, pp. 1237–1246, 2013.
- [73] M. Krawczynski, M. Strobel and R. Gottschalg, „Intercomparison of spectroradiometers for out-door performance monitoring“, in *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 2009*.
- [74] J. Martínez-Lozano, M. Utrillas, R. Pedrós, F. Tena, J. Díaz, F. Expósito, J. Lorente, X. de Cabo, V. Cachorro, R. Vergaz and V. Carreño, „Intercomparison of spectroradiometers for global and direct solar irradiance in the visible range“, *J. Atmos. Ocean Technol.*, vol. 20, pp. 997, 2003.
- [75] A. Habte, A. Andreas, L. Ottoson, C. Gueymard, G. Fedor, S. Fowler, J. Peterson, E. Naranen, T. Kobashi, A. Akiyama and S. Takagi, „Indoor and outdoor spectroradiometer intercomparison for spectral irradiance measurement“, *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2014*.
- [76] R. Galleano, W. Zaaiman, A. Virtuani, D. Pavanello, P. Morabito, A. Minuto, A. Spena, S. Bartocci, R. Fucci, G. Leanza, D. Fasanaro and M. Catena, „Intercomparison campaign of spectroradiometers for a correct estimation of solar spectral irradiance: Results and potential impact on photovoltaic devices calibration“, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 22, no. 11, pp. 1128–1137, 2014.
- [77] R. Galleano, W. Zaaiman, C. Strati, S. Bartocci, M. Pravettoni, M. Marzoli, R. Fucci, G. Leanza, G. Timò, A. Minuto, M. Catena, F. Aleo, S. Takagi, A. Akiyama, R. Nuñez and G. Belluardo, „Second international spectroradiometer intercomparison: Results and impact on PV device calibration“, *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, vol. 23, no. 7, pp. 929–938, 2015.
- [78] R. Galleano, Zaaiman, A.-A. D. W., A. Minuto, N. Ferretti, R. Fucci, M. Pravettoni, M. Halwachs, M. Friederichs, F. Plag, D. Friedrich and E. Haverkamp, "Results of the fifth international spectroradiometer comparison for improved solar spectral irradiance measurements and related impact on reference solar cell calibration", *IEEE J. Photovolt.*, vol. 6, no. 6, pp. 1587-1597, 2016.
- [79] F. Kneizys, E. Shettle, L. Abreu, J. Chetwynd, G. Anderson, W. Gallery, J. Selby and S. Clough, „Users guide to LOWTRAN7“, *Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom, MA, 1988*.
- [80] S. M. Anderson, „Ozone absorption cross section measurements in the Wulf bands“, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 20, pp. 1579–1582, 1993.
- [81] A. Berk, L. S. Bernstein and D. C. Robertson, „MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN7“, *Air Force Geophysical Laboratory, Hanscom, MA, 1989*.
- [82] P. Ricchiazzi, S. Yang, C. Gautier and D. Sowle, „SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth’s atmosphere“, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 79, pp. 2101–2114, 1998.

- [83] S. Yang, P. Ricchiazzi and C. Gautier, „Modified correlated k-distribution methods for remote sensing applications“, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 64, pp. 585-608, 1999.
- [84] J. R. Key and A. J. Schweiger, „Tools for atmospheric radiative transfer: Streamer and FluxNet“, *Comput. Geosci.*, vol. 24, no. 5, pp. 443–451, 1998.
- [85] S. Clough, F. Kneizys, L. Rothman and W. Gallery, „Atmospheric spectral transmittance and radiance: FASCOD1B“, in *SPIE*, Washington, D.C., 1981.
- [86] A. Kylling, „Radiation transport in cloudy and aerosol loaded atmospheres“, Ph.D. Alaska University., 1992.
- [87] S. Kato, T. Ackerman, J. H. Mather and E. Clothiaux, „The k-distribution method and correlated-k approximation for a shortwave radiative transfer model“, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 62, no. 1, pp. 109–121, 1999.
- [88] R. W. Mueller, C. Matsoukas, A. Gratzki, H. D. Behr and R. Hollmann, „The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance - A LUT based eigenvector hybrid approach“, *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, no. 5, pp. 1012–1024, 2009.
- [89] R. Mueller, T. Behrendt, A. Hammer and A. Kemper, „A new algorithm for the satellite-based retrieval of solar surface irradiance in spectral bands“, *Remote Sensing*, vol. 4, no. 3, pp. 622-647, 2012.
- [90] R. Bird, „A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance“, *Sol. Energy*, vol. 32, pp. 461–471, 1984.
- [91] S. Nann and C. Riordan, „Solar spectral irradiance under clear and cloudy skies - Measurements and a semi-empirical model“, *J. Appl. Meteor.*, vol. 30, pp. 447, 1991.
- [92] C. Gueymard, „Development and performance assessment of a clear sky spectral radiation model“, in *22nd ASES Conf. Solar '93*, Washington D.C., 1993.
- [93] C. Gueymard, „Simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine, version 2 (SMARTS2): Algorithms description and performance assessment“, *Florida Solar Energy Center*, Cocoa, FL, 1995.
- [94] B. Mayer, „Radiative transfer in the cloudy atmosphere“, *Eur. Phys. J. Conferences*, vol. 1, pp. 75–99, 2009.
- [95] A. Macke, J. Mueller, K. Nagel and R. Stuhlmann, „A cellular automaton model for cloud formation“, in *IRS96: Current Problems in Atmospheric Radiation*, 1997.
- [96] W. Blättner, H. Horak, D. Collins and M. Wells, „Monte Carlo studies of the sky radiation at twilight“, *Appl. Opt.*, vol. 13, pp. 534–537, 1974.
- [97] J. Widlowski, B. Pinty, M. Lopatka, C. Atzberger, D. Buzica, M. Chelle, M. Disney, J. Gastellu-Etchegorry, M. Gerboles, N. Gobron, E. Grau, H. Huang, A. Kallel, H. Kobayashi, P. E. Lewis, W. Qin, M. Schlerf, J. Stuckens and D. Xie, „The fourth radiation transfer model intercomparison (RAMI-IV): Proficiency testing of canopy reflectance models with ISO-13528“, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 1-22, 2013.

- [98] M. Gostein and L. Dunn, "Light Soaking Effects on Photovoltaic Modules: Overview and Literature Review", Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Seattle, Washington, June 19-24, 2011.
- [99] D. Dirnberger, "Uncertainty in PV module measurement—part II: verification of rated power and stability problems", IEEE Journal of Photovoltaics, May 2014; 4: 991–1007.
- [100] "IEC 61215 Ed.1: Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval –Part 2: Test procedures", 2016.
- [101] M. Schweiger, "Performance of PV Modules with Different Technologies and the Impact on Energy Yield in Four Climatic Zones", Doctoral Thesis, <http://publications.rwth-aachen.de/record/711967/files/711967.pdf>, 2017.
- [102] W. Herrmann, M. Schweiger, L. Rimmelpacher, "Solar simulator measurement procedures for determination of the angular characteristic of PV modules", 29th EUPVSEC, Amsterdam, 2014
- [103] W. Herrmann, L. Rimmelpacher, U. Jahn, "Optical characterization of PV modules", WCPEC-6, Kyoto, 2014
- [104] S. Janke, S. Pingel, B. Litzenburger, J. Dittrich, and M. Strasser, "Technology Comparison of Different Types of Solar Cells and Modules Regarding Weak Light and Yield Performance", Proc. 28th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib., no. November, 2013.
- [105] B. C. Duck and C. J. Fell, "Comparison of Methods for Estimating the Impact of Spectrum on PV Output", in 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015, pp. 1–6.
- [106] T. Minemoto et al., "Uniqueness verification of solar spectrum index of average photon energy for the evaluating outdoor performance of photovoltaic module", Solar Energy, vol. 83., pp.1294-1299, 2009.
- [107] "Characterisation of Performance of Thin Film Photovoltaic Technologies", Report IEA-PVPS T13-02:2014.
- [108] G. Friesen et al., "Optimization of Thin Film Module Testing and PV Module Energy Rating at SUPSI", BFE Report, 2015
- [109] G. Belluardo, P. Ingenhoven, W. Sparber, J. Wagner, P. Weihs and D. Moser, "Novel method for the improvement in the evaluation of outdoor performance loss rate in different PV technologies and comparison with two other methods", Solar Energy, vol. 117, pp. 139–152, 2015.
- [110] G. Makrides, B. Zinsser, G. Georghiou, M. Schubert and J. Werner, "Degradation of different photovoltaic technologies under field conditions", in 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2010.
- [111] D. Jordan, R. Smith, C. Osterwald, E. Gelak and S. Kurtz, "Outdoor PV degradation comparison", in 35th IEEE Specialists Conference, 2010.
- [112] A. Kimber, T. Dierauf, L. Mitchell, C. Whitaker, T. Townsend, J. NewMiller, D. King, J. Granata, K. Emery, C. Osterwald, D. Myers, B. Marion, A. Pligavko, A. Panchula, T. Levitsky, J.

- Forbess and F. Talmud, „Improved test method to verify the power rating of a photovoltaic (PV) project“, in 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2009.
- [113] D. C. Jordan, M. G. Deceglie and S. R. Kurtz, „PV degradation methodology comparison - A basis for a standard“, in 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2016.
- [114] A. Kyprianou, A. Phinikarides, G. Makrides and G. E. Georghiou, „Definition and computation of the degradation rates of photovoltaic systems of different technologies with robust principal component analysis“, IEEE J. Photovolt., vol. 5, no. 6, pp. 1698–1705, 2015.
- [115] A. Phinikarides, G. Makrides, B. Zinsser, M. Schubert and G. E. Georghiou, „Analysis of photovoltaic system performance time series: Seasonality and performance loss“, Renewable Energy, vol. 77, pp. 51–63, 2015.
- [116] D.C. Jordan and S.R. Kurtz, „Analytical improvements in PV degradation“, in 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2010.
- [117] P. Ingenhoven, G. Belluardo, D. Moser, „Comparison of Statistical and Deterministic Smoothing Methods to Reduce the Uncertainty of Performance Loss Rate Estimates“, IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 8, NO. 1, JANUARY 2018.
- [118] International Electrotechnical Committee, „IEC 61724: Photovoltaic system performance monitoring guidelines for measurement, data exchange, and analysis“, 1998.
- [119] C. Whitaker, T. Townsend, J. Newmiller, D. King, W. Boyson, J. Kratochvil, D. Collier and D. Osborn, „Application and validation of a new PV performance characterization method“, in 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1997.
- [120] D. Moser, M. Pichler and M. Nikolaeva-Dimitrova, „Filtering procedures for reliable outdoor temperature coefficients in different photovoltaic technologies“, Journal of Solar Energy Engineering, vol. 136, no. 2, pp. 21006, 2013.
- [121] B. Marion, J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond, T. Fletcher, B. Canada, D. Narang, A. Kimber, L. Mitchell, G. Rich and T. Townsend, „Performance parameters for grid-connected PV systems“, in 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.
- [122] C. Schwingshackl, M. Petitta, J. E. Wagner, G. Belluardo, D. Moser, M. Castelli, M. Zebisch and A. Tetzlaff, „Wind effect on PV module temperature“, Energy Procedia, vol. 40, pp. 77-86, 2013.
- [123] D. Bartholomew, G. Box, G. Jenkins, „Time series analysis forecasting and control“, Operat. Res. Quart. 22 (2), 199–201. 1971.
- [124] G03 Committee, „Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37 Tilted Surface“, ASTM International, 2012.
- [125] International Electrotechnical Committee, „IEC 60891:2009 Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics“, 2009.
- [126] R.B. Cleveland, W. S. Cleveland, J. E. McRae and I. Terpenning, „STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess“, J. Off. Stat., vol. 5, no. 1, pp. 3–33, 1990.

- [127] A. Mermoud and T. Lejeune, "Performance Assessment of A Simulation Model For PV Modules Of Any Available Technology", 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 2010.
- [128] PVSol, Valentin Software
- [129] CEC, "California Solar Initiative Incentive Calculators" from <http://www.csiepb.com/documentation.aspx>.
- [130] J. Sutterlueti, S. Ransome, et al. "Characterizing PV modules under outdoor conditions: What's most important for Energy Yield", EU PVSEC, Hamburg, Germany, 2011.
- [131] S. Sellner, J. Sutterlueti, et al. "Understanding Module Performance further: validation of the novel loss factors model and its extension to ac arrays", 27th EU PVSEC, Germany, 2012.
- [132] S. Ransome, J. Sutterlueti, et al. "PV technology differences and discrepancies in modelling between simulation programs and measurements", 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 3061-3066, 2012.
- [133] J. Stein, C. Cameron, B. Bourne, A. Kimber, J. Posbic and T. Jester, "A Standardized Approach to PV System Performance Model Validation", IEEE Photovoltaics Specialists Conference (PVSC), 2010.
- [134] C.W. Hansen. "Parameter Estimation for Single Diode Models of Photovoltaic Modules", Sandia National Laboratories Report: SAND2015-2065, 2015.
- [135] W. De Soto, S.A. Klein, and W.A. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Solar Energy, 80(1), pp. 78-88, 2006
- [136] Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML), "Evaluation of measurement data— An Introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents, JCGM 104:2009. Se`vres, France: International Bureau of Weights and Measures (BIPM), 2009.
- [137] M. Munoz, F. Chenlo, and M. Alonso-Garcia, "Influence of initial power stabilization over crystalline-Si photovoltaic modules maximum power", Progress in Photovoltaics: Research and Application, Volume 19, Issue 4, pp. 417–422, 2011.
- [138] T.J. Silverman, M.G. Deceglie, B. Marion, and S.R. Kurtz, "Performance Stabilization of CdTe PV Modules Using Bias and Light", IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 5, no. 1, 2015.
- [139] M.G. Deceglie, T.J. Silverman, K. Emery, D. Dirnberger, A. Schmid, S. Barkaszi, N. Riedel, L. Pratt, S. Doshi, G. Tamizhmani, B. Marion, and S.R. Kurtz, "Validated Method for Repeatable Power Measurement of CIGS Modules Exhibiting Light-Induced Metastabilities", IEEE Journal Of Photovoltaics, vol. 5, no. 2, pp. 607-612, 2015.
- [140] D. Dirnberger, U. Kräling, H Müllejans, E. Salis, K. Emery, and Y. Hishikawa, "Progress In Photovoltaic Module Calibration: Results of a Worldwide Intercomparison Between Four Reference Laboratories", Measurement Science and Technology, vol. 25, 2014.
- [141] W. Herrmann, S. Zamini, F. Fabero, T. Betts, N. van der Borg, K. Kiefer, G. Friesen, H. Muellejans, H.-D. Mohring, M.Vasques, D. Fraile, "PV moduel output power

characterisation in test laboratories and in the PV industry – results of the European Performance project “, 25th EU PVSEC / WCPEC-5, September 2010.

- [142] H.S. Rauschenbach, “Electrical Output of Shadowed Solar Arrays,” Proc. 7th IEEE PV Specialists Conf. November 1968.
- [143] A. Catani, F. Gómez, R. Pesch, J. Schumacher, D. Pietruschka, U. Eicker, “Shading Losses of Building Integrated Photovoltaic Systems”, Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 3129-3133, Spain, 2008.
- [144] M.C. Alonso-Garcia, J.M. Ruizb, F. Chenlo, “Experimental Study of Mismatch and Shading Effects in the I–V Characteristic of a Photovoltaic Module”, Solar Energy Materials & Solar Cells Vol. 90, pp. 329–340, 2006.
- [145] A. Kovach and J. Schmid, “Determination of Energy Output Losses Due to Shading of Building-Integrated Photovoltaic Arrays Using a Raytracing Technique”, Solar Energy Vol. 57(1966) , No. 2, pp. 117-124.
- [146] J. Dubard, J.-R. Filtz, V. Cassagne, P. Legrain, “Photovoltaic module performance measurements traceability: Uncertainties survey”, Measurement vol. 51, 451–456, 2014.
- [147] B.C. Duck, C.J. Fell, M. Campanelli, B. Zaharatos, B. Marion and K. Emery, “Determining Uncertainty for I-V Translation Equations”. Proc. 40th IEEE Photovoltaic Spec. Conf., June 8-13, 2014, Denver, CO, pp. 181-186, DOI: 10.1109/PVSC.2014.6925518.
- [148] D. Dominé, A. Jagomägib, A.G. de Montgareuil, G. Friesen, E. Möttusb, H. Mohring, D. Stellbogen, T. Betts, R. Gottschalg, T. Zdanowicz, M. Prorok, F. Fabero, D. Faiman, W. Herrmann, “Uncertainties Of PV Module - Long-Term Outdoor Testing”, proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition /5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2010.
- [149] D. Dirnberger, “Uncertainty in PV module measurement—part I: calibration of crystalline and thin film modules” IEEE Journal of Photovoltaics 2013; 3: 1016–1026.
- [150] K. Emery, “Photovoltaic Calibrations at the National Renewable Energy Laboratory and Uncertainty Analysis Following the ISO 17025 Guidelines”, September 2016, NREL tech rep., NREL/TP-5J00-66873.
- [151] C. Hansen, J. Stein, S. Miller, W. Boyson, J. Kratochvil, D. King, "Parameter Uncertainty in the Sandia Array Performance Model for Flat-Plate Crystalline Silicon Modules", in 37th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 2011, p. 3138 – 3143.
- [152] H. Mullejans, W. Zaaiman, and R. Galleano, “Analysis and mitigation of measurement uncertainties in the traceability chain for the calibration of photovoltaic devices”, Meas. Sci. Technol. 20 (2009) 075101 (12pp) doi:10.1088/0957-0233/20/7/075101.
- [153] K. Whitfield and C. R. Osterwald, “Procedure for Determining the Uncertainty of Photovoltaic Module Outdoor Electrical Performance”, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2001; 9:87±102 (DOI:10.1002/pip.356).
- [154] D.R. Myers, K.A. Emery, and T.L. Stoffel, “Uncertainty Estimates for Global Solar Irradiance Measurements Used to Evaluate PV Device Performance,” Solar Cells, vol. 27, pp. 455-464, 1989.

- [155] L. Dunn, M. Gostein, and K. Emery, "Comparison of Pyranometers vs. PV Reference Cells for Evaluation of PV Array Performance". Proc. 38th IEEE Photovoltaic Spec. Conf., Austin, TX, June 3-8, 2012, pp. 2899-2904.
- [156] J. Meydbray, E. Riley, L. Dunn, K. Emery and S. Kurtz, "Pyranometers and Reference Cells: Part 2: What Makes the Most Sense for PV Power Plants?", PV Magazine, April 2013 pp. 82-86.
- [157] I. Reda, D. Myers and T. Stoffel, "Uncertainty Estimate for the Outdoor Calibration of Solar Pyranometers: A Metrologist Perspective", Measure, Vol. 3 No. 4, pp. 32-40, December 2008
- [158] R. Haselhuhn, U. Hartmann, P. Vanicek, "Uncertainty in Yield Prediction – What Are the Causes, How Can They Be Reduced?", 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition /5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September 2010, pp. 4722-4725, Valencia, Spain
- [159] M.G. Kratzenberg , H. G. Beyer , S. Colle , A. Albertazzi , "Uncertainty calculations in pyranometer measurements and application", Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers (ASME), International Solar Energy Conference (ISEC), 2006.
- [160] Standard ASTM G213-17, "Standard Guide for Evaluating Uncertainty in Calibration and Field Measurements of Broadband Irradiance with Pyranometers and Pyrhemometers".
- [161] J.H. Ebinger and W. Warta , "Uncertainty of the spectral mismatch correction factor in STC measurements on photovoltaic devices", Prog. Photovolt: Res. Appl. 2011; 19:573–579, DOI: 10.1002/pip.1059.
- [162] K.A. Emery, C.R. Osterwald, and C.V. Wells, "Uncertainty Analysis of Photovoltaic Efficiency Measurements", Proc. 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., New Orleans, LA, May 4-8, pp. 153-159, IEEE, New York, 1987.
- [163] R.J. Matson, K.A. Emery, and R.E. Bird, "Terrestrial Solar Spectra, Solar Simulation and Solar Cell Short-Circuit Current Calibration: A Review," Solar Cells, vol. 11, pp. 105-145, 1984.
- [164] C.R. Osterwald, S. Anevsky, K. Bücher, A.K. Barua, P. Chaudhuri, J. Dubard, K. Emery, B. Hansen, D. King, J. Metzendorf, F. Nagamine, R. Shimokawa, Y.X. Wang, T. Witchen, W. Zaيمان, A. Zastrow, and J. Zhang, "The World Photovoltaic Scale: An International Reference Cell Calibration Program", Progress in Photovoltaics Research and Applications, vol. 7, pp. 287-297, 1999.
- [165] W. Kolodenny, T. Zdanowicz, "Errors Introduced by Numerical Integration when Calculating Energy Rating of PV Modules", 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006.
- [166] S. Ransome and P. Funtan, "Why Hourly Averaged Measurement Data is Insufficient to Model PV System Performance Accurately", 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, June 2005.
- [167] D. Jordan, S. Kurtz, "Dark Horse of Evaluating Long-Term Field Performance - Data Filtering", NREL tech report NREL/JA-5200-57898, IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 4 (1) January 2014 pp. 317-323.

부록 1: 설문지

다양한 기후에서 모듈 에너지수율 측정에 대한 설문지

서론

태양광모듈은 표준시험조건(STC) 하에서 측정된 출력 산출량에 따라 가격이 책정된다. 그러나 최종 사용자는 모듈이 생산한 에너지와 실제 작동조건에서의 수명에 더 관심이 있는데, 왜냐하면 이것이 투자회수기간에 직접 영향을 미치기 때문이다. 출력등급 시스템에서 에너지 기반 등급으로의 태양광 지표의 변화는 미래에 새로운 혁신적이고 비용 효과적인 기술의 개발을 뒷받침하면서 다양한 태양광기술의 경쟁력을 더 강화시킬 것이다. 이 문제를 부분적으로 극복할 수 있는 태양광모듈용의 새로운 에너지등급 규격은 현재 IEC [IEC 61853]에서 준비 중에 있는데, 산업계에 의해 채택되기 전 최종안이 나오고 검증되기까지는 아직 좀 더 노력이 필요하다. 그리고 여기에서는 모듈 수명에 대한 고려가 되어 있지 않다.

다양한 기후 위치에서 태양광모듈의 에너지수율 측정은 IEC 61853 에너지등급 규격의 검증과 모듈 성능 및 수명의 실증과 이해도 증진에 중요한 역할을 한다. 실제 작동조건에서 신뢰할 수 있고 정확한 장기 측정은 다양한 에너지 예측 모델뿐 아니라 기후에 따른 에너지등급을 수명 예측과 수명 기간의 에너지등급으로 확장할 수 있게 해 줄 것으로 기대되는 새로운 가속 노화 절차를 정의하는데 있어서도 결정적으로 중요하다.

이 목표를 달성하기 위해서는 고품질의 데이터가 절대적으로 요구되지만, 이들 측정들을 어떻게 이행하는지에 대한 가용한 규격은 현재 없는 실정이다. 부정확한 측정 혹은 불충분한 검증 연구에 기반한 모듈 순위, 에너지수율과 수명 예측에서의 높은 불확도는 재정적인 위험도를 더 높이게 된다. 명확하게 규정되지 않은 불확도는 잘못된 위험 추정으로 태양광 시장에 손상을 줄 수 있다.

범주

이 설문서의 목적은, 전세계에서 현재 어떻게 모듈 에너지수율 측정이 이행되고, 어떻게 불확도가 계산되고, 최종 수요자에게 보고되는지에 대한 상세한 정보 수집이다. 이런 입력자료를 토대로, 다양한 기후에서 측정된 데이터의 비교가능성을 개선하기 위해 무엇이 필요한지, 어떻게 측정과 시설이 서로 통일된 조화를 이룰 수 있는지에 대한 질문이 제기될 것이다.

설문조사의 결과물은:

- **공용 보고서** '태양광모듈 장기 옥외 에너지수율 측정-현재 접근방법과 장비(Long-term Photovoltaic Module Outdoor Energy Yield Measurements - existing approaches and equipment)'.

이 설문조사에서 수집된 데이터는 비밀로 다룰 것이며 관계 파트너들의 승인 후에 익명으로 발간될 것이다!

지침

다음 사항을 고려하여 양식을 채우세요,

- 더 많은 시험시설을 운영한다면 가장 좋은/가장 대표적인 케이스만 고려하거나 혹은 2 개 이상의 설문지를 채우세요
- 복수 선택을 허용
- 고유의 숫자로 대답이 안되면 전형적인 값 그리고/혹은 범위를 명시하세요
- 필요하다면, NA (정보 가용하지 않음) 혹은 ND (정보 정의되지 않음) 를 사용하세요
- 유용하다고 생각되는 곳에는 코멘트를 추가하세요
- 이해를 높이기 위해서라면 문서, 그림을 추가하세요

가장 중요한 참고문헌을 추가하세요(자체 소유나 3 자로부터)

일반 정보

Company/Institute:

Contact person:

Email:

1. 배경 정보

1.1 옥외 측정의 범주는?	<input type="checkbox"/> 모듈 에너지수율 벤치마킹(kWh/kW 상호 비교)
	<input type="checkbox"/> 모듈 열화 연구
	<input type="checkbox"/> 에너지 추정 모델의 검증
	<input type="checkbox"/> 모듈 프로토타입의 최적화
	<input type="checkbox"/> 출력 등급 (규격 IEC61853-1 8.4 절 트랙커 없이 태양광 하에서의 절차)
	<input type="checkbox"/> 기타, 다른 범주 제시 _____
1.2 시험의 주안점은?	<input type="checkbox"/> 연구 지향
	<input type="checkbox"/> 소비자/투자자 지향 (제조업체 명의의 발간)
	<input type="checkbox"/> 산업계 지향 (자산 데이터)
1.3 옥외시험에 대한 경력은 몇 년이고 얼마나 많은 유형의 모듈 시험을 했는지?	
1.4 시험의 일반적인 지속시간은?	<input type="checkbox"/> 단기(<6 개월)
	<input type="checkbox"/> 중기(6-24 개월)
	<input type="checkbox"/> 장기 (>2 년)
1.5 다양한 기후에서 모듈 시험을 하는지?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes, 기후 분류에 따른 기후 유형의 명시 https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6ppen_climate_classification
1.6 ISO 17025 인정을 받았는지?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes, STC 출력 측정
	<input type="checkbox"/> yes, 출력 측정 (IEC61853 part 1)
	<input type="checkbox"/> yes, 모듈 적격성 시험 (IEC61215/61646)
	<input type="checkbox"/> yes, 에너지수율 측정 ⁴

⁴ YES 에 표시한 것은, 시험이 기관의 인정 범위내에 있으며 감사를 받았음을 의미한다. 측정 불확도와 검증을 포함하는 문서화된 절차서도 가용하다는 의미이다.

2. 시험 시료 (샘플링/특성분석)

2.1 유형 당 최저/일반적인 모듈의 개수는?	
2.2 샘플링 절차를 따르는지? ⁵ <i>(예: 육안검사, 플래시 목록, 전기적 성능, 무작위 샘플링 등)</i>	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes, _____
2.3 암상태에 보관한 기준 모듈이 있는지?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes
2.4 통상적으로 예비 모듈이 있는지?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes
2.5 현장에 설치 전에 모듈 특성분석을 하는지? <i>(예: Pm@STC, IEC 61853, EL 등)</i>	<input type="checkbox"/> no (여기에 대한 코멘트)
	<input type="checkbox"/> yes, 시험을 명시하세요
2.6 특성분석 혹은 현장에 설치 전에 어떤 안정화 처리를 하는지?	<input type="checkbox"/> no (여기에 대한 코멘트)
	<input type="checkbox"/> yes, 안정화 절차를 명시하세요
2.7 중간 측정을 하는지? <i>(예: STC 출력의 제어, IR, EL 등)</i>	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes, 시험을 명시하세요
2.8 최종 측정을 이행하는지? <i>(예: STC 출력의 제어, IR, EL 등)</i>	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes, 시험을 명시하세요
2.9 중간 혹은 최종 측정 전에 어떤 안정화 처리를 하는지?	<input type="checkbox"/> no (여기에 대한 코멘트)
	<input type="checkbox"/> yes, 명시하세요

² 어떻게 하는지 자세하게 기술하세요. 샘플링 절차는 다음 사항에 중요하다:

- 이상값이나 혹은 고장 모듈을 배제
- 대표적인 모듈을 시험 (생산 허용도를 고려)
- 모듈의 개수와 선정된 기준을 정의

기타 코멘트:

3. 시험 장비의 기술 (모듈 I/V 측정)

장비: 제조업체/이름		
방법론:	<input type="checkbox"/> only MPPT (e.g. power optimizer)	
	<input type="checkbox"/> only I-V	
	<input type="checkbox"/> MPPT with I-V	
부하:	능동 부하	<input type="checkbox"/> MPP
	수동 부하	<input type="checkbox"/> fixed load (resistor)
		<input type="checkbox"/> Voc
		<input type="checkbox"/> other _____
I-V 트레이서의 사양서와 데이터 프로세싱 ⁶:	사분면	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4
	동기화 I/V 데이터	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no
	I 자동 범위	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no
	V 자동 범위	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no
	풀 스케일 V 측정 정확도	
	풀 스케일 I 측정 정확도.	
	통상의 I-V 주사 시간	
	고용량(capacitive) 모듈의 주사 시간?	<input type="checkbox"/> 구분하지 않음. 모든 모듈의 주사 시간은 동일 <input type="checkbox"/> 용량성 영향을 피하기 위해 주사 시간 최적화.
	기본 I-V 주사 방향	<input type="checkbox"/> Isc→Voc <input type="checkbox"/> Voc→Isc <input type="checkbox"/> Isc↔Voc
	I-V points	
	2 개 I-V 곡선 사이의 기본 샘플링 빈도 간격	
	I-V 파라미터 외삽의 유형 (linear fit, polynomial fit, ...)	Isc
		Voc
		Pmax
	여러 개의 모듈을 병렬하여 시험 시 데이터는 동기화 되는가?	<input type="checkbox"/> yes (individual sync. I-V tracers)
<input type="checkbox"/> no (individual not sync. I-V tracers) max delay _____		
<input type="checkbox"/> no (multiplexing), max delay _____		

³ 선택한 법이 'only MPPT' 이면 무시하세요

MPP 트랙커 사양서와 데이터 프로세싱 ⁷:	MPP 트랙킹 알고리즘		
	정적 트랙킹 효율		
	동적 트랙킹 효율		
	I auto-range	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no	
	V auto-range	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no	
	V 측정 정확도		
	I 측정 정확도		
	보통 저장되는 Im, Vm 값	<input type="checkbox"/> instantaneous values	rate: _____
		<input type="checkbox"/> average of _____	rate: _____
동기화 모듈 데이터	<input type="checkbox"/> yes		
	<input type="checkbox"/> no, max delay module data _____		
조사강도 측정의 동기화:	I-V 트레이서 데이터와 동기화 ³	<input type="checkbox"/> simultaneous I, V, G measurement	
		<input type="checkbox"/> single meas. before or after I-V curve max delay _____	
		<input type="checkbox"/> single meas. before and after I-V curve max delay _____	
		<input type="checkbox"/> other, specify _____	
	MPPT 데이터와 동기화 ⁴	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no, max delay _____	
kWh 적분:	I-V 데이터로부터 계산된	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no	
	MPPT 데이터로부터 계산된	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no	
	에너지 카운터	<input type="checkbox"/> yes, accuracy _____ <input type="checkbox"/> no	
교정 절차:	기본 간격		
	교정받은 기관	<input type="checkbox"/> ISO17025 인정 시험실	
		<input type="checkbox"/> 기타 명시하세요:	
하드웨어 작동조건: <i>시험 장비의 정확도가 보장되는 조건</i>	온도 구간		
	덥거나 습한 기후의 경우 제어와 에어컨 유형		

⁴ 선택한 법이 'only I-V' 이면 무시하세요

기타 코멘트:

4. 면내/경사면 조사강도 센서의 기술

	서술 (제조업체, 센서 모델, 가열/환기 유닛 선택, 확산 링 등)	샘플링 속도	정확도 [k=2]	n°
일사량계: 각 시험시설용 센서의 최저 개수				
기준 셀: 셀 유형을 명시				
PR 계산에 사용되는 기준 조사강도:				
교정 절차: (간격, 소급성 체인 등)				

기타 코멘트:

5. 모듈 온도 센서의 서술

	서술
센서 유형:	<input type="checkbox"/> PT100/PT1000 <input type="checkbox"/> RTD <input type="checkbox"/> other _____
모듈 당 개수:	
위치 선정:	
고정하기(테이프, 실리콘 등):	
측정 정확도:	

기타 코멘트:

6. 기상 센서의 서술

	서술 (센서 모델)	Sampling rate	Accuracy	n°
글로벌 수평면 조사강도:				
확산 수평면 조사강도:				
직달 법선면 조사강도:				
자외 복사계:				
알베도:				
주위 온도:				
풍속:				
풍향:				
공기 상대습도:				
기압:				
강수량:				
기타:				

기타 코멘트:

7. 분광 복사계의 서술

	서술
제조업체/이름:	
센서 유형:	
파장 범위:	
입구 광학(entrance optic):	
위치선정:	<input type="checkbox"/> 경사 <input type="checkbox"/> 수평
측정 간격:	
저장된 데이터:	<input type="checkbox"/> raw data <input type="checkbox"/> APE <input type="checkbox"/> MM factor (for modules) <input type="checkbox"/> other _____
교정 절차: (간격, 소급성 체인 등)	

기타 코멘트:

8. 시험 스탠드의 서술

방향:	<input type="checkbox"/> 최적에 가까움	
	<input type="checkbox"/> 연 중 변화	
	<input type="checkbox"/> 파사드 혹은 지붕 설치 옵션	
설치 장착 유형:	<input type="checkbox"/> 표준 오픈 랙	
	<input type="checkbox"/> BIPV 솔루션	
	<input type="checkbox"/> 양면형	
지면:	지면/알베도 유형	
	지면으로부터 최저 거리를 고려하는지?	<input type="checkbox"/> no
		<input type="checkbox"/> yes, 명시하세요 _____
시험사이트의 균일성: <i>하나의 숫자 혹은 각 포인트에 대한 코멘트. 의견이 없으면 NA 라고 추가.</i>	모듈 사이의 추정 정렬불량?	
	모듈과 센서 사이의 추정 정렬불량?	
	추정 조사강도 불균일성?	
	추정 열적 불균일성? <i>장애물이나 혹은 주위의 차이에 따라 차이 발생</i>	
센서 위치선정:	모듈과 조사강도 센서 사이의 최대 거리	
	면내 조사강도 센서의 최저 개수?	
	시험장으로부터 풍속 센서의 최대 거리	
배선:	4-선 연결	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no
	기타 배선 손실?	<input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> yes, specify _____

기타 코멘트:

9. 유지관리

9.1 고장 탐지 대비한 경보 시스템이 있는지?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes 간격:
9.2 규칙적 육안검사를 시행하는지? <i>예: 모듈 파손, 오염, 온도 센서 등</i>	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes 간격: 제어 유형을 명시하세요:
9.3 모듈을 청소하는지?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes, 간격 _____
	<input type="checkbox"/> yes, 기준 _____
9.4 조사강도 센서를 청소하는지?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes, 간격 _____
	<input type="checkbox"/> yes, 기준 _____
9.5 시험시설의 사진을 보존하는지 (웹캠)?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes, 간격 _____
9.6 로그북을 가지고 있는지 (비정상, 수리, 교체, 눈 등)?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes

기타 코멘트:

10. 데이터 프로세싱

<p>10.1 데이터에 대한 어떤 자동적인 개연성 확인을 이행하는지 그리고 오류/나쁜 데이터를 표시하는지?</p>	<input type="checkbox"/> no yes, <input type="checkbox"/> 누락 데이터 <input type="checkbox"/> 범위 밖 <input type="checkbox"/> 연결 끊어진 모듈 <input type="checkbox"/> 비정상 피크 <input type="checkbox"/> 잡음성 시그널 <input type="checkbox"/> 음영이 생긴 모듈 <input type="checkbox"/> 눈 탐지 <input type="checkbox"/> 온도 센서의 부분적 혹은 완전 분리 <input type="checkbox"/> 못쓰게 된 I-V 곡선, 명시하세요 _____ <input type="checkbox"/> _____ <input type="checkbox"/> _____
<p>10.2 어떤 중복 분석을 이행하는지? 예: 여러 개의 센서/모듈</p>	<input type="checkbox"/> no yes, 다음 사항을 확인한다. <input type="checkbox"/> 조사강도 시그널의 드리프트 (센서의 불량 혹은 오염) <input type="checkbox"/> 모듈 시그널의 드리프트 (모듈의 불량 혹은 오염 혹은 데이터 습득에의 문제) <input type="checkbox"/> 기타 _____
<p>10.3 시간 경과에 대한 안정성을 확인하기 위해 측정 출력을 보정하는지?</p>	<input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> yes, 어떻게 혹은 참고 사항을 기술하세요:
<p>10.4 kWh/kW 를 계산하기 위해 사용하는 STC 출력은 무엇?</p>	<input type="checkbox"/> 명판 <input type="checkbox"/> 옥내 측정 STC 출력 <input type="checkbox"/> 옥외 측정 STC 출력 (솔라 트랙커) <input type="checkbox"/> 옥외 측정 STC 출력 (고정형 랙) 접근방법을 기술하고 추출된 STC 출력의 불확도 $u[k=2]$
<p>10.5 다른 무슨 순간적인 데이터가 계산되는지?</p>	<input type="checkbox"/> 에너지 AM <input type="checkbox"/> 입사각 AOI <input type="checkbox"/> 포톤 평균에너지 APE <input type="checkbox"/> _____
<p>10.6 매일 무슨 합계 데이터를 계산하는지?</p>	<input type="checkbox"/> 에너지 E [kWh] <input type="checkbox"/> 조사강도 H [kWh/m ²] <input type="checkbox"/> 성능비 PR [-] <input type="checkbox"/> 최저, 최대, 평균 모듈 온도 [°C] (시간 간격 내에서)

	<input type="checkbox"/> 최저, 최대, 평균 주위 온도 [°C] (시간 간격 내에서)
	<input type="checkbox"/> 최저, 최대, 평균 풍속 [m/s] (시간 간격 내에서)
	<input type="checkbox"/> 24 시간 최저, 최대, 평균 모듈 온도 [°C]
	<input type="checkbox"/> 24 시간 최저, 최대, 평균 주위 온도 [°C]
	<input type="checkbox"/> 24 시간 최저, 최대, 평균 풍속 [m/s]
	<input type="checkbox"/> 조사강도 가중 모듈 온도 Tmod,w [-]
	<input type="checkbox"/> UV (명시하세요)
	<input type="checkbox"/> 강수량 [mm]
	<input type="checkbox"/> 기타
10.7 일별 유형에 따라 기상 데이터를 분류하는지?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes, day types 와 그들이 어떻게 결정되는지 기술하세요
10.8 기타 무슨 합계 데이터를 계산하는지?	<input type="checkbox"/> 월간 <input type="checkbox"/> 연간 <input type="checkbox"/> 총계
10.9 이른 아침 혹은 오후 데이터는 배제하는지? <i>kWh 와 같이 매일의 합계 데이터 계산에 고려되지 않는 데이터</i>	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes 기준을 명시하세요:
10.10 합계 값을 계산할 때 다른 어떤 필터를 적용하는지?	<input type="checkbox"/> no
	<input type="checkbox"/> yes, 접근방법을 명시하세요:

기타 코멘트:

11. 불확도 계산

11.1 순간적인 값에 대한 불확도를 명시하는지? <i>예: Im, Vm, Pm, Isc, Voc, G, T 등</i>)	<input type="checkbox"/> no	
	<input type="checkbox"/> yes	
11.2 합계 값에 대한 불확도 추정을 하는지? <i>예: E, H, PR 등</i>	<input type="checkbox"/> no	
	<input type="checkbox"/> yes	
11.3 1년 동안 측정된 c-Si 모듈의 일반적인 불확도를 확장 불확도로 나타내면 ($k=2$)	E [kWh] \pm x%	
	H [kWh/m ²] \pm x%	
	PR [-] \pm x%	
11.4 불확도 계산은 ISO GUM 규격에 따라 이행한 것인지?	<input type="checkbox"/> yes	
	<input type="checkbox"/> no, 접근방법을 명시하세요 _____	
11.5 불확도 계산 절차를 기술하는 참고 문서/시트가 있는지?	<input type="checkbox"/> no	
	<input type="checkbox"/> yes, 가용하면 참고문서를 명시하세요	
11.6 그것을 IEA Task 13 내에서 공유할 수 있는지?	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no	

기타 코멘트:

12. 리포팅

<p>12.1 에너지수율 보고용 표준 양식이 있는지?</p>	<p><input type="checkbox"/> no</p> <p>yes, 다음 항목을 포함한다.</p> <p><input type="checkbox"/> 시험 사이트의 기술 (AZ, EL, mounting)</p> <p><input type="checkbox"/> 시험 절차의 기술</p> <p><input type="checkbox"/> 계산의 기술</p> <p><input type="checkbox"/> 시험 소자의 기술</p> <p><input type="checkbox"/> 모듈의 추가 시험 리포터 (특성분석)</p> <p><input type="checkbox"/> 기상 데이터</p> <p><input type="checkbox"/> kWh/kW 순위</p> <p><input type="checkbox"/> 월간, 연간 그리고 총 에너지 산출량 과 성능비</p> <p><input type="checkbox"/> 옥외 데이터의 측정 불확도</p> <p><input type="checkbox"/> 열화율</p> <p><input type="checkbox"/> 데이터 손실 (표시 단위) _____</p> <p><input type="checkbox"/> _____</p> <p><input type="checkbox"/> _____</p>
<p>12.2 열화율 계산을 어떻게 하는지? ⁸</p>	
<p>12.3 a-Si 같은 준안정 기술에 대한 보고를 어떻게 하는지? ⁵</p>	
<p>12.4 낮은 조사강도의 영향을 어떻게 고려하는지? ⁵</p>	
<p>12.5 온도의 영향을 어떻게 고려하는지? ⁵</p>	

⁵ 데이터를 어떻게 나타내는지 참고문서나 혹은 사례를 하나 추가하세요(그림 + 서술).

<p>12.6 분광 조사강도의 영향을 어떻게 고려하는지?⁵</p>	
<p>12.7 서로 다른 기후로부터의 시험결과를 어떻게 비교하는지?⁵</p>	
<p>12.8 보고서에 다른 정보를 추가하는지? <i>예: 다른 기후로의 변환, 이론적인 값, 에너지 라벨 등</i></p>	

기타 코멘트:

13. 모델링

13.1 측정데이터를 모델링한 데이터와 비교하는지?	<input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> yes
13.2 사용하는 모델은 무엇? <i>(모델이 여기에 충분하다는 것을 기술하는 참고)</i>	
13.3 모듈의 무슨 입력 파라미터가 필요한지? <i>(STC 값 혹은 I-V 곡선, 온도계수, 풀 매트릭스 등)</i>	
13.4 모델의 검증에 필요한 입력 데이터는 무엇?	<input type="checkbox"/> 글로벌 면내 조사강도 (일사량계) <input type="checkbox"/> 글로벌 수평면 조사강도 <input type="checkbox"/> 직달 법선면 조사강도 혹은 확산 조사강도 <input type="checkbox"/> 분광 조사강도 <input type="checkbox"/> 풍속 <input type="checkbox"/> 주위 온도 <input type="checkbox"/> 모듈 후면 온도 <input type="checkbox"/> 풀 I-V 곡선 <input type="checkbox"/> Pm 값 <input type="checkbox"/> Im 과 Vm 값 <input type="checkbox"/> Isc 값 <input type="checkbox"/> Voc 값 <input type="checkbox"/> 기타 _____
13.5 모델에 필요한 데이터의 분해능은 무엇?	

기타 코멘트:

14. 모니터링

14.1 단일 모듈의 자체 모니터링 데이터를 TASK 13 내에서 공유하는데 관심이 있는지?	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no
14.2 공유할 수 있는 시분해적 데이터는 무엇?	<input type="checkbox"/> 글로벌 면내 조사강도 (일사량계) <input type="checkbox"/> 글로벌 수평면 조사강도 <input type="checkbox"/> 직달 법선면 조사강도 <input type="checkbox"/> 확산 수평면 조사강도 <input type="checkbox"/> 분광 조사강도 <input type="checkbox"/> 풍속 <input type="checkbox"/> 주위 온도 <input type="checkbox"/> 모듈 후면 온도 <input type="checkbox"/> 풀 I-V 곡선 <input type="checkbox"/> Pm 값 <input type="checkbox"/> Im 과 Vm 값 <input type="checkbox"/> Isc 값 <input type="checkbox"/> Voc 값 <input type="checkbox"/> AM, AOI <input type="checkbox"/> APE <input type="checkbox"/> 조사강도 안정성
14.3 데이터의 시간 분해능은?	
14.4 IEC 61853 에 따른 모듈의 추가 시험이 필요한지?	<input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no

기타 코멘트:

부록 2: 시험 시설 시트

SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST FACILITIES

Responsible institution
AIT Austrian Institute of Technology
Giefinggasse 4
1210 Vienna, Austria
www.ait.ac.at/en/research-fields/photovoltaics/

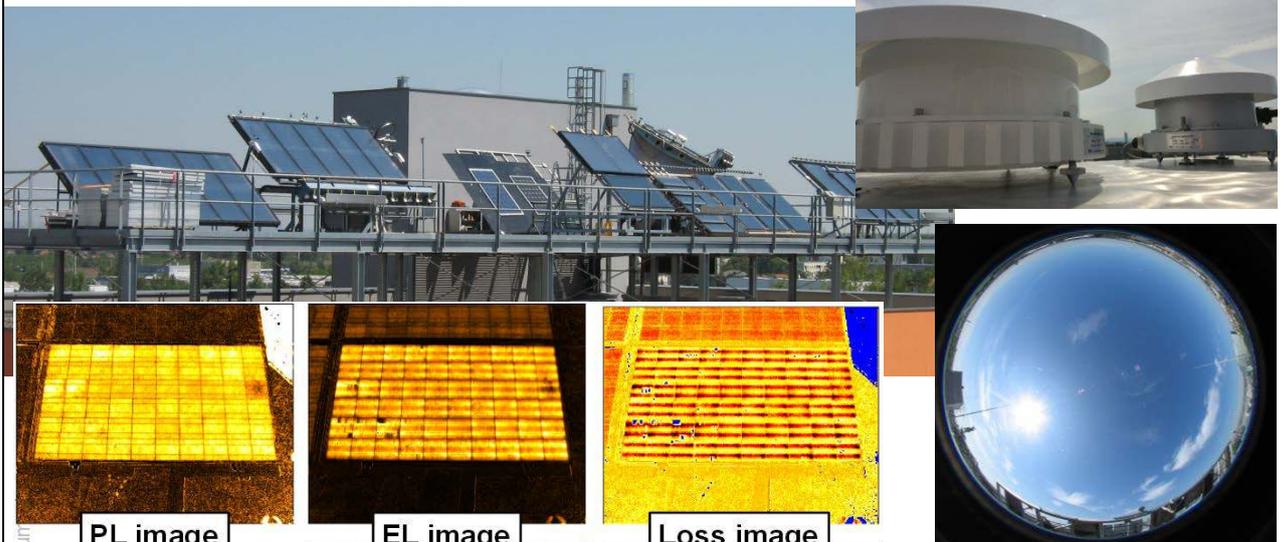


기반시설 위치: Vienna, 오스트리아

소개

측정 플랫폼을 갖춘 옥외 시험 시설 구비. 시험시설은 ISO/IEC 17025 인정을 받았고, 고품질 IECIEE CBTL 스킴 운영하면서 IEC 61215, IEC 61853 및 IEC 61730 규격에 따른 시험 서비스 제공. 태양광 스트링 혹은 모듈의 단기와 장기 평가 제공. 특별 관심 분야: 초기 열화, PID 같은 열화 메커니즘. 추가 평가 관련 서비스: 정확한 출력 산출량, 에너지수율 평가. 전기광학(EL 혹은 고정화 서모그래피) 혹은 광학적 방법(자외선-형광 혹은 적외-서모그래피)뿐 아니라 전기적 측정에 의한 열화 메커니즘 조사). Pannonian 저지대에 있는 플랫폼은 대륙성 기후에 속해 있다. 특별 시설 혹은 모듈 설계도 포함될 수 있다.

사진:



기술 세부사항 :

측정 항목 : 출력 측정, 에너지수율 평가, NMOT(5 초 간격), 환경 파라미터, 분광복사계(300~1600nm), 구름 카메라(1 분 간격), 풍속 2D, 조사강도, PID-장치, IV-측정 혹은 고정 부하 포인트, 1-축과 2-축 트랙커

참고문헌:

- [1] R. Ebner, B. Kubicek, G. Újvári, S. Novalin, M. Rennhofer, M. Halwachs: "Optical Characterization of Different Thin Film Module Technologies"; International Journal of Photoenergy, Article ID 159458, p. 1 – 12 (2015).
- [2] M. Knausz, G. Oreski, G. Eder, Y. Voronko, B. Duscher, T. Koch, G. Pinter, K. Berger: "Degradation of photovoltaic backsheets: Comparison of the aging induced changes on module and component level"; J. APPL. POLYM. SCI. Vol. 132(24), p. 42093 - 42100 (2015)

SHORT PRESENTATION OUTDOOR MODULE TEST FACILITIES



Responsible institution

CEA at INES
73375 Le Bourget-du-Lac – FRANCE
<http://www.cea.fr/english/Pages/research-areas/renewable-energies.aspx>
www.durasol.fr

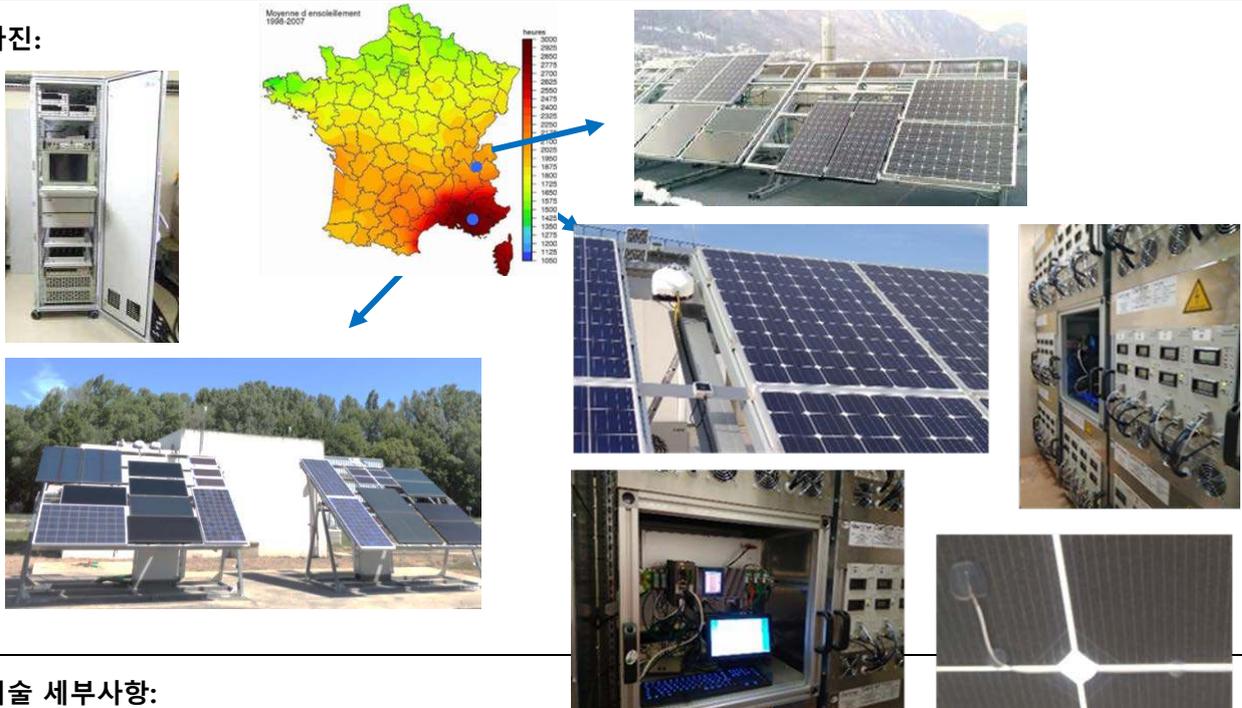
기반시설 위치:

73375 Le Bourget-du-Lac, 13115 Saint-Paul-lez-Durance - 프랑스

소개:

태양광모듈 성능은 1983년부터 실제 작동조건과 다양한 기후(지중해 Cadarache, 고산지 Pic de Bures Mount, 반대륙성 INES) 하에서 CEA (Alternative Energy and Atomic Energy Commission)가 연구하고 있다. 이들 플랫폼 내에서 CEA는 IV 곡선 트레이서를 사용하는 개별 모듈 모니터링용으로 200 이상의 옥외 채널을 운영하고 있다. 지금까지 약 400 개의 모듈이, 한편으로는 상업용기술의 벤치마킹 목적으로 다른 한편으로는 모듈의 혁신을 추진하기 위한 목적으로 옥외에서 연구되었는데, 이들 옥외 측정은 플래쉬-테스트, EL, 환경 챔버, 고정화 서모그래피, 고전압 스트레스, 자외선 스트레스 등을 사용한 옥내 신뢰성 및 내구성 시험과 결합되어 있다.

사진:



기술 세부사항:

채널의 일부는 2개의 IV 곡선 사이에서 MPP 추적을 하는 상업용 소자들이고, 다른 채널들은 IV 곡선과 Voc 혹은 2개의 곡선 사이의 고정 부하목적으로 특별히 개발한 것이다. IV 곡선은 매 5분마다 자동으로 측정되며, 기상 분석과 필터링 및 보정이 가능하도록 조사강도와 모듈온도는 매 1분마다 모니터링한다.

참고문헌:

- [1] "In situ monitoring of degradation processes inside PV modules of different technologies with VIM", J. Merten et al., 24th EU-PVSEC, 2009, Hamburg, Germany.
- [2] "Performance Analysis of Crystalline Silicon PV Modules After 18 Months Exposure under Tropical Climate", L. Mabilille, G. Razongles, L. Sicot, J. Merten, 26th EU-PVSEC, 2011, Hamburg, Germany.

**SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST FACILITIES**

Responsible institution
PV Performance Laboratory
CSIRO Energy Centre
10 Murray Dwyer Cct, Mayfield West, NSW 2304
AUSTRALIA
www.csiro.au – www.csiro.au/energy



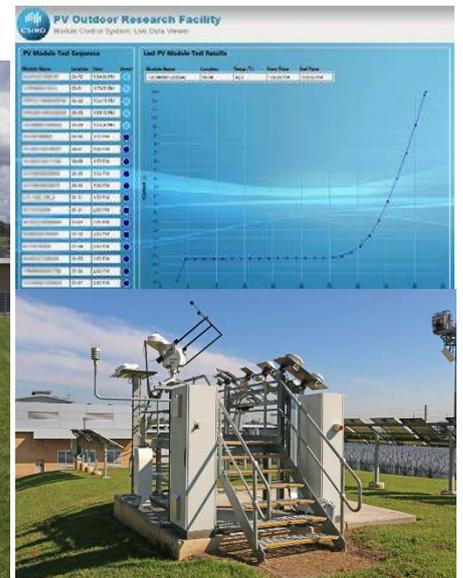
기반시설 위치:

Newcastle, New South Wales, 오스트레일리아

소개:

CSIRO의 태양광 성능 시험실은 태양광 셀과 모듈의 성능 연구와 시험 목적의 옥내와 옥외 측정 세트이다. 셀 측정 실험실은 ISO/IEC 17025 인정을 보유하고 있고, 상업용 규모의 모듈용 인정 획득을 위한 개선이 추진 중이다. 옥외 태양광 연구기설(PVORF)은 2013년부터 운영 중에 있다. 여기서의 측정 결과는 소비자 보호용 기사뿐 아니라 다양한 연구 발간물에 사용되고 있으며, 회사들이 부수적인 제품을 개발하도록 도움을 주고, 법적 절차를 알려준다.

사진:



기술적 세부사항:

PVORF는 상업용과 연구용 모듈의 진단 시험용으로 60개의 개별 시험 베드를 운영하는데, 북향에 경사각 30°로 되어 있다. I-V 곡선은 원하는 시간에 측정할 수 있고, 중간 측정에서는 사이트에서의 사용 목적으로 에너지 산출량이 기록된다. 각 모듈의 후면 온도를 기록하고 오염 영향을 방지하기 위해 모듈은 규칙적으로 청소한다. 태양과 기상 조건의 모니터링은 고정밀의 지상 스테이션으로 이행하는데, 이는 글로벌 "Baseline Surface Radiation Network"의 한 부분이다. 태양광 스펙트럼 역시 300~1700 nm 파장 범위에서 측정한다.

참고문헌:

- [1] Duck, B.C., Fell, C.J., Anderson, K.F., Sacchetta, C., Du, Y., Zhu, Y., 2018. Determining the value of cooling in photovoltaics for enhanced energy yield. *Sol. Energy* 159, 337–345. doi:10.1016/j.solener.2017.11.004
- [2] Duck, B.C., Fell, C.J., 2016. Improving the Spectral Correction Function. 2016 IEEE 43rd Photovolt. Spec. Conf. 2647–2652.

**SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST FACILITIES**

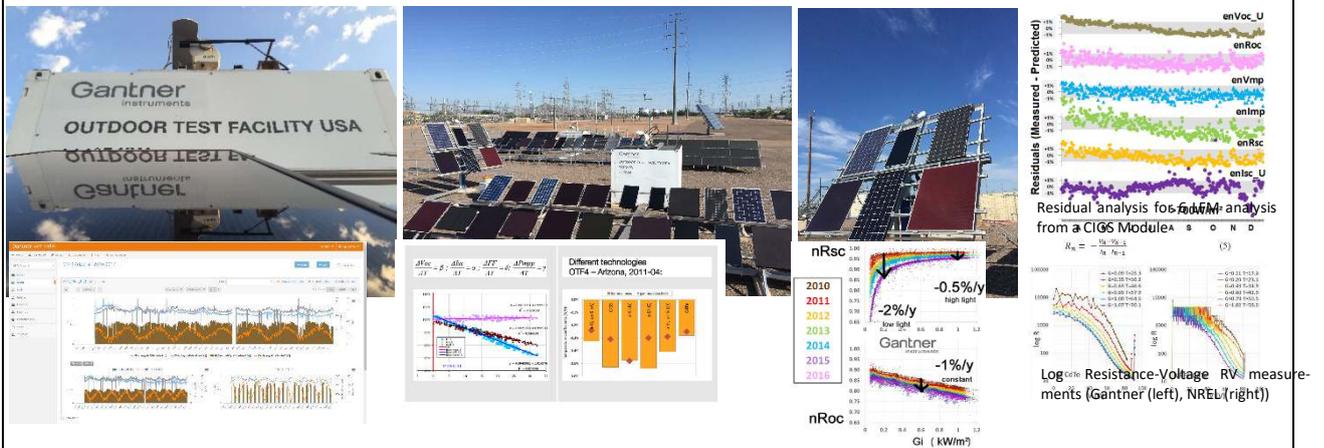


Responsible institution
PV Outdoor Monitoring Team
Contact: j.sutterlueti@gantner-instruments.com

기반시설 위치: Tempe, Arizona, 미국 and many worldwide customer installations

소개: 이 회사의 옥외시험시설 [Outdoor Test Facility \(OTF\)](#) 은 태양광모듈의 쉽고 정확한 검증과 기술 비교 목적에 요구되는 모든 데이터셋을 제공한다. 여기서는 추적 기록 데이터를 생성하고 은행성 지원을 위해 모든 태양광기술(500 Wp까지)의 에너지수율, 낮은 조사강도 거동과 열적 계수용 모든 파라미터 측정을 이행한다. 태양광모듈의 실제 거동은 모듈 생산업체, 시스템 통합업체, 보험회사, 은행, 투자자, 연구개발 파트 및 태양광기술을 이해하고 확인하고 싶은 사람들에게는 필수적이다.

컨퍼런스 논문으로부터의 사진과 그림:



기술적 세부사항: 분석 기능: 에너지수율 파라미터(PRdc, YA, YR), 연간 태양 시간 | 고정형, 트랙커 설치모듈의 일/월/연간 성능 | 벤치마킹, 트랙킹의 혜택 검증, 장기 추이, 결함 발견 | 열적, 낮은 조사강도, 입사각 거동, 계절적 검증, LID 영향 | 분광 민감도 | 시뮬레이션 (PVsyst, PVLlib) 검증 | 손실인자 모델 (LFM) 계수, 기계론적 성능 모델 (MPM) 계수

모듈의 특성을 확인하기 위한 핵심 특징: 측정 범위: 0...60V, 0...50A, Pmax: 500W (800W max.) | 24bit resolution with 1200Vdc galvanic isolation, 50kHz sample rate | Dynamic sweep time and scan interval | Tracking modes (Mpp, Voc, Isc) | Fully synchronized scan concept | Calculation of key parameters (Isc, Rsc, Imp, Vmp, Roc, Voc) (curvature parameters for I mismatch and Rollover) | Output of Coefficient for Models (Loss Factors Model (LFM) and Mechanistic Performance Model (MPM), SAPM, .) | Reliable software with special self-monitoring features, automatic data check, user alerts | Reliable and proven industry components and calibrated sensors | Standalone Plug & Play system for indoor/outdoor use (IP65), customized channels

참고문헌:

- [1] J. Sutterlüt et al.; "Characterizing PV modules under outdoor conditions: What's most important for energy yield"; Proceedings 26th EUPVSEC, (2011), pp.3608-3614.
- [2] Sellner et al.; "Understanding Module Performance further: validation of the novel loss factors model and its extension to ac arrays "; 27th PVSEC Frankfurt 2012
- [3] J. Sutterlueti et al: „Improved PV Performance Modelling by Combining the PV_LIB Toolbox with the Loss Factors Model (LFM)", IEEE PVSC 42, New Orleans 2015

**SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST
FACILITIES**

**Institute of Electrical Engineering,
Chinese Academy of Sciences**



Responsible institution
Photovoltaic and Wind Power
Systems Quality Test Center(PV
Test Center), Institute of Electrical
Engineering, Chinese Academy of
Sciences (IEE,CAS) www.iee.cas.cn

기반시설 위치:

Gong He county, Qinghai Province, 중국

소개 :

PV Test Centre of IEE 는 태양광 셀과 모듈의 성능 측정에 대해 중국 CMA와 CNAS으로부터 ISO 17025 인정을 받았다. 2009년에 Task 13에 합류하였고, 다양한 기후조건 하에서의 모듈 불량 특성분석, 신뢰성과 내구성 측정 기술에 대한 연구를 시작하였다. 옥외와 옥내 측정 데이터를 결합하여 모듈의 전기적 성능, 안전 신뢰성과 기계적 스트레스 분석을 하고 있다. 2012~2014 기간에 중국 칭하이성 내에 모듈(용량: 1MW)용 옥외시험 사이트를 구축하였다. 11개의 다른 종류의 모듈이 설치되었고 장기 성능 시험 중에 있다. 2017년에는 상해와 씨닝에 2개의 루프탑 모듈 실증 플랫폼을 구축하고 덥고 습한 기후와 고원 기후 하에서의 모듈 성능 비교 시험을 수행 중에 있다.

사진:



기술적 세부사항:

옥외 멀티채널 I-V 시험 시스템은 정확도 높은 데이터 획득시스템과 최대 출력점 트래킹을 갖추고 다양한 모듈의 장기 및 동기화 시험에 사용할 수 있다. 핵심 성능 파라미터(최대 출력, 조사강도, 모듈온도), MPR 및 모듈 출력손실을 자동적으로 처리하고 계산할 수 있다. 기상 스테이션은 솔라 트래커, 직달 일사량계, 일사량계, 자외 복사계, 온도와 습도 센서, 풍속계와 기압계를 갖추고 있다. I-V 디어터와 기상 데이터를 결합하여 전형적인 환경조건 하에서 다양한 모듈의 에너지수율 성능을 분석한다.

참고문헌:

- [1] Haitao Liu, Performance Ratio Measurement Method of Photovoltaic Modules under Natural Sunlight Condition, 29th CCDC, Chongqing 2017.
- [2] Haitao Liu, Irradiance and Temperature Dependence Characterization of Vacuum Glass BIPV Modules, Applied Mechanics and Materials Mechanical Science and Engineering, 2014.

**SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST
FACILITIES**



Fraunhofer

ISE

Responsible institution
Fraunhofer Institute for Solar Energy
Systems (ISE)
Freiburg, Germany
www.ise.fraunhofer.de

기반시설 위치:

Freiburg (독일), Gran Canaria (스페인), Negev desert (이스라엘)

소개:

태양광시스템에 영향을 미치는 기후조건은 위치에 따라 달라지므로 태양광모듈과 태양열 집열기의 소재와 부품에 요구되는 조건이 달라진다. 본 연구소는 태양광모듈과 태양열 집열기의 신뢰성에 미치는 다양한 기상 조건의 영향을 평가하기 위해 기후가 다른 4개 지역에 옥외 시험 시설을 운영하고 있다. 옥외시험 사이트는 자체 인정 시험소인 Fraunhofer ISE Callab PV Modules 과 TestLab PV Modules 로부터 시장에서 요구하는 최고의 규격, 정밀도와 정확도 측면에서 도움을 받고 있다.

사진:



기술적 세부사항:

태양광모듈의 IV 곡선, 모듈온도 및 환경조건의 장기 기록을 위한 고유의 태양광 모니터링 시스템을 개발하였다. 이 시스템이 자체 시험 사이트와 고객이 희망하는 사이트에서 사용된다. 모듈들은 동시에 측정되고 측정 멈춤 시에 MPP로 저장된다. 모듈 관련과 환경 데이터는 품질 관리와 파라미터 추출을 위해 일일 사후처리 절차를 거치고 그 다음에 시료와, 시험 사이트와 옥내외 데이터를 측정하는 센서들을 연결하는 고성능 데이터베이스에 저장된다. 데이터 분석과 평가는 Python 의 장점을 사용하는 최근의 조사결과들뿐 아니라 잘 알려진 루틴과 표준 절차를 포함하는 강력한 Python 프레임워크를 사용하여 수행된다.

참고문헌:

- [1] Schill, C., Brachmann, S. & Koehl, M. Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules. Solar Energy 112, 259–262 (2015).
- [2] Koehl, M., Heck, M. Load evaluation of PV-modules for outdoor weathering under extreme climatic conditions. 4th European Weathering Symposium 2009, Budapest, Hungary, September 2009

**SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST
FACILITIES**



Responsible institution
Engie Laborelec
1630 Linkebeek - Belgium
www.laborelec.be

기반시설 위치:

Linkebeek, 벨기에 and Arica, 칠레 (Atacama desert)

소개:

Laborelec 은 제품의 노화와 에너지수율의 거동에 대한 이해를 높이고, 기술적인 취약점을 확인하고 해결하거나 혹은 그 개선방법을 알려주기 위한 목적으로 실험실에서 태양광 제품을 시험한다. 옥외 모듈 시험 벤치는 다양한 태양광기술(c-Si, 박막, 유기와 페로브스카이트)을 통합하여 2009 년부터 운용되고 있다.

Laborelec 은 또한 전세계에 설치된 태양광 파일럿용 모니터링 플랫폼뿐 아니라 파사드 일체형 유기 태양전지 파일럿 (콘크리트 기반으로 유리에 일체화), 마이크로그리드에 연결된 지상용 태양광 기반시설, 태양광 + 배터리 시스템 (기업 대 소비자 활용 목적으로 자체 소비 최대화)을 운용하고 있다. Laborelec 은 또한 칠레(아타카마 사막, 전세계에서 조사강도가 가장 높은 곳 중의 하나)에 양면형, 집광형 태양광 및 다른 태양광기술을 포함하는 시험 기반시설도 운용하고 있다.

사진:



기술적 세부사항:

시험 벤치에서 모듈은 개별적으로 혹은 2 개 모듈을 하나의 스트링으로 DC 측(MPP 데이터 평균 1 분, IV 곡선 매 15 분)에서 정확하게 모니터링된다. 모듈온도와 주위온도 센서, 하나의 기준 셀 및 2 개의 일사량계(경사면과 수평면 글로벌 조사강도, 확산 조사강도)도 설치에 포함되어 있다.

참고문헌:

**SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST FACILITIES**



Responsible institution
Research Group Energy & Automation
(KU Leuven)
<https://iiv.kuleuven.be/onderzoek/eena>

기반시설 위치:

Gent, 벨기에

에너지 및 자동화 연구 그룹은 셀의 옥내 분광 분석뿐 아니라 옥외에서 모듈의 에너지수율 특성분석에 대해 Imec 과 EnergyVille 과 협력하면서 2008 년부터 산업계를 위해 태양광 셀과 모듈에 대한 연구를 수행하고 있다.

사진:



기술적 세부사항:

옥내 측정은 각도에 따른 분광 데이터를 확보할 수 있는 능력과 함께 IQE/EQE 같은 셀의 특성을 결정하는데 목표를 두고 있다. 옥외 측정은 다중의 고 정밀 모듈온도 센사와 함께 고 정밀의 자체 개발 소자, 상업용 I-V 트레이서와 MPP 트랙커를 결합 사용하여 수행하고 있다. 모든 측정은 기상 스테이션 데이터와 고 분해능(1 Hz) 으로 저장된 데이터와 조합을 한다.

참고문헌:

- [1] B. Herteleer, B. Huyck, F. Catthoor, J. Driesen and J. Cappelle, "Normalised Efficiency of Photovoltaic Systems: Going beyond the Performance Ratio", Solar Energy, vol. 157, pp. 408-418, 2017.
- [2] B. Herteleer, B. Morel, B. Huyck, Cappelle, R. Appels, B. Lefevre, F. Catthoor and J. Driesen, "High Frequency Outdoor Measurements of Photovoltaic Modules Using an Innovative Measurement Set-Up," in 29th EU PVSEC, Amsterdam, 2014.

**SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST FACILITIES**



Responsible institution
National Renewable Energy Laboratory
15013 Denver West Parkway
Golden, CO 80401-3305
www.nrel.gov

기반시설 위치: Golden, Colorado

소개:

NREL 은 1981 년부터 셀, 모듈 및 시스템 수준에서의 태양광 모니터링, 분석과 모델링에 참여하고 있다. 모듈과 시스템의 장기 성능을 시험하고 태양광의 신뢰도를 개선하기 위한 시험방법을 찾아내기 위한 목적으로 가속시험장비로 모듈과 시스템의 스트레스 저항성을 시험하고, 태양광 사용을 보증하기 위한 목적으로 국제적인 표준을 창출하는 노력을 하고 있다. 매년, National Center for Photovoltaics (NCPV)는 태양광 신뢰성에 관한 정보교환을 권장하기 위해 산업계 "PV Reliability Workshop"을 주최하고 있다. 소자 성능 그룹은 전류-전압, 양자효율 및 다양한 범위의 셀과 모듈 기술에 대한 측정을 수행한다. 여기에는 상업용, 개발용 및 산학의 과학자의 연구용 시료가 포함된다. 이 그룹은 일차 기준 셀과 이차 기준 셀 그리고 이차 모듈 교정과 시간 경과에 따른 모듈 출력 측정에 관한 ISO 17025 인정을 보유하고 있다. 소자 성능 그룹이 보고하는 모든 측정에 대해서는 ISO 9001 인정이 되어 있다. 태양광 관련 시설에는 Outdoor Test Facility (OTF), Solar Energy Research Facility (SERF) 및 Energy Systems Integration Facility (ESIF)이 포함되어 있다. NCPV 소속의 OTF 연구자들은 시뮬레이션된, 가속 옥내와 옥외 그리고 일반적인 옥외 조건에서 첨단 기술과 새롭게 떠오르는 태양광 기술을 연구하고 평가한다.

사진:



기술적 세부사항: 태양광 특성분석 장비와 시험 베드의 목록과 기술적 세부사항은 다음 항목을 포함한다: 솔라 시뮬레이터, 옥외 테스트베드, 분광감응 설비. 소자성능 그룹은: <https://www.nrel.gov/pv/device-performance.html>. 모듈과 시스템 수준에서의 신뢰도, 에너지등급, 표준은 PV reliability and Engineering 그룹: <https://www.nrel.gov/pv/reliability-engineering.html>

참고문헌:

- [1] M. G. Deceglie, L. Micheli, M. Muller, "Quantifying Soiling Loss Directly from PV Yield" IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 8 (2), 2018 pp. 547-551.
- [2] K. Jordan, M. Deceglie, C. Deline, D. Jordan, "Calculating PV Degradation Rates Using Open-Source Software," SolarPro Vol. 11(2), 2018
- [3] D. Jordan, C. Deline, S. Kurtz, G. Kimball, M. Anderson, "Robust PV Degradation Methodology and Application," IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 8(2), 2018 pp. 525-531.
- [4] B. Marion and B. Smith, "Photovoltaic System Derived Data for Determining the Solar Resource and for Modeling the Performance of Other Photovoltaic Systems," Solar Energy Vol. 147(1), 2017 pp. 349-357.
- [5] B. Marion, "Numerical Method for Angle-of-Incidence Correction Factors for Diffuse Radiation Incident Photovoltaic Modules," Solar Energy Vol. 147(1), 2017 pp. 344-348.

**SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST FACILITIES**



Responsible institution
Sandia National Laboratories
<https://pv.sandia.gov>

기반시설 위치: Albuquerque, New Mexico 미국

소개:
샌디아 태양광시스템 평가 연구실(Sandia's Photovoltaic Systems Evaluation Laboratory: PSEL)은 1976 년부터 태양광 셀, 모듈과 시스템을 시험해 오고 있다. PSEL 은 현재 모듈과 시스템의 옥내와 옥외 특성분석과 신뢰성 평가에 전문화되어 있으며 New Mexico Regional Test Center 와 PV Lifetime 프로젝트를 주관하고 있다. 50 개 이상의 서로 다른 태양광기술들이 현장에서 평가 중에 있는데, 대상은 최신의 모듈과 셀 기술, 양면형 기술, 태양광 지붕재, 반사장비와 오염 방지 코팅, 모듈 수준의 전력전자와 모니터링 시스템을 망라한다.



- 기술적 세부사항:**
- 7 에이커의 부지에 고정형 경사면 랙과 시스템 수준의 연구용 1-축 트래커
 - 2 개의 대형 2-축 트래커로 8 개의 모듈(추적되는)을 동시에 측정할 수 있는 IV 데이터 획득 시스템을 가진 다중 시험이 가능한 사이트 배치
 - 스펙트럼을 포함한 태양광 종합 기상 스테이션
 - 조사강도 소자용 옥외 교정 시설
 - 인버터의 DC 와 AC 사이드에서 시스템 출력의 지속적인 모니터링용 장비
 - 현장에서 시간 경과에 따른 모듈과 스트링 IV 곡선 측정용 자동화 이동형 IV 트레이서
 - 옥내 모듈 시험실: Spire 4600 SLP 플래쉬 테스터, Reltron EL 유닛, Dark IV, FLIR 적외 특성분석, Atonometrics 광조사 스테이션

참고문헌:

[1] King, B. H., et al. (2016). Procedure to Determine Coefficients for the Sandia Array Performance Model (SAPM). Albuquerque, NM, Sandia National Laboratories. **SAND2016-5284**.

[2] King, D. L., et al. (2004). Photovoltaic Array Performance Model. Albuquerque, NM, Sandia National Laboratories. **SAND2004-3535**.

SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST FACILITIES

University of Applied Sciences and Arts
of Southern Switzerland

Responsible institution
PVLab (SUPSI-ISAAC)
6952 Canobbio – Switzerland
www.supsi.ch/isaac

SUPSI

기반시설 위치:

Canobbio (Lugano) - Switzerland

소개:

1991년부터 실제 작동조건 하에서의 태양광모듈 에너지수율 모니터링과 분석이 SUPSI PVLab 핵심 활동의 한 영역이 되었다. 최근 수년간은 건물일체형 모듈에 핵심을 두고 다양한 제품과 기술의 성능을 비교분석하고 있다. 2001년부터 옥외 측정이 옥내 성능측정과 결합되었고, 2008년부터는 요구에 따라 여러 신뢰성 시험(노화, 기계적 안정성과 안전)과 결합하고 있다. 소비자 주문형의 시험 스탠드도 특별한 특징(즉, 후면 절연, 컬러 프린팅, 오염방지, 음영 허용도, 빛 포획 증강 등)의 연구목적으로 개발가능하다. 태양광모듈이 시험과 관련하여 SAS로부터 ISO 17025 인정을 받았다.

사진:



기술적 세부사항:

모든 측정은 IV 트레이서 기능(MPPT3000)과 조사강도와 온도 모니터링용 채널을 가진 자체 개발한 고정밀 최대 출력점 트래커로 이행한다. 측정은 기상 스테이션과 분광 데이터와 결합된다. 경보 기능을 가진 정교한 품질관리 절차는 현재 가능한 최고의 측정 정확도를 보여준다. 매일의 데이터 프로세싱은 매일의 유형과 전형적인 환경 파라미터뿐 아니라 모든 핵심 성능지표, 손실 인자를 결정하기 위해 자동적으로 이루어진다.

참고문헌:

- [1] S. Dittmann et al.: Energy yield measurements at SUPSI - importance of data quality control and its influence on kWh/Wp inter-comparisons, 26th EPVSEC, Hamburg, September 2011.
- [2] G. Friesen et al., "A 4 year energy yield inter-comparison of thin-film modules: linking indoor to outdoor performance data", 6th WCPEC, Kyoto 2014.

**SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST
FACILITIES**



Responsible institution:
TÜV Rheinland Energy GmbH
Am Grauen Stein
51105 Cologne, Germany
www.tuv.com/solarenergy

기반시설 위치:

Cologne (독일), Tempe (Arizona 미국), Chennai (인도), Thuwal (사우디아라비아)

소개: TÜV Rheinland 는 독일 PV-KLIMA 연구 프로젝트의 일환으로 이 시험시설을 개발하였다. 4개의 시스템이 2013년부터 운용 중에 있는데, 4개의 위치는 다양한 기후에 속해 있다: Cologne (독일, 온건 Cfb), Tempe (미국, 사막 Bwh), Chennai (인도, 아열대 Aw) Thuwal (사우디아라비아, 사막 Bwh). 옥외 설치 전에 시험 모듈의 에너지수율 성능을 IEC 1853-1 과 IEC 61853-2에 따라 옥내에서 측정한다. 다음과 같은 서비스를 제공한다.

- 다양한 기후에서의 태양광모듈의 에너지 생산과 성능손실 분석
- 계절적 영향, 전기적 안정성과 출력 산출량 열화 분석
- 기상과 환경 파라미터의 연도별 변화에 대한 장기 분석

사진:



Cologne (Germany)



Chennai (India)



Tempe (Arizona)



Thuwal (Saudi Arabia)

기술적 세부사항:

시스템은 30 개까지의 모듈 에너지수율 비교 측정을 할 수 있다. 시험시료는 전자 부하에 연결되어 있는데, 이는 최대 출력 모드에서 동기화 작동한다. 에너지수율 외에 모듈의 I-V 곡선이 10 분 간격으로 측정된다. 시험시설은 300~1600 nm 범위의 분광 조사강도를 비롯한 모든 관련 파라미터의 측정과 함께 기상 스테이션을 포함한다. 그리고 오염 손실도 모니터링된다.

참고문헌:

- [1] M. Schweiger, W. Herrmann, A. Gerber, U. Rau: Understanding the Energy Yield of Photovoltaic Modules in Different Climates by Linear Performance Loss Analysis of the Module Performance Ratio, IET Renewable Power Generation, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0682
- [2] M. Schweiger, J. Bonilla, W. Herrmann, A. Gerber, U. Rau: Performance Stability of Photovoltaic Modules in Different Climates, Progress in Photovoltaics, 2017, DOI: 10.1002/pip.2904

SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST FACILITIES

Responsible institution
 PV Technology Laboratory
 1678 Nicosia- Cyprus
www.pvtechnology.ucy.ac.cy/



University of Cyprus
PV Technology

기반시설 위치:

Nicosia - 사이프러스

소개: 2005년에 설립된 PV Technology Laboratory 는 사이프러스 대학의 일 부분이며 셀/모듈과 시스템 수준에서의 태양광 연구용의 최신 옥내 및 옥외 기반시설로 구성되어 있다. 옥외 시설은 IEC 61724에 의해 설정된 요구조건에 따라 모든 중요한 환경과 태양광시스템의 작동 파라미터를 고 분해능으로 측정하고 모니터링하는 진단 장비로 구성되어 있다. 현재 50개 이상의 태양광기술이 장기 평가 목적으로 시험 사이트에 제출되어 있다. 태양광기술은 고정형과 트래킹 장착 구조 둘 다의 형태로 옥외에 설치되어 있다. 옥외 장비에는 추가적으로, 가속 열화 시험용으로 개발된 PID 장치와 함께 프로그램 작동이 가능한 계통연계형 인버터, 모듈 IV 곡선 트래킹, MPP 트래커가 포함된다.

사진:



기술적 세부사항: 태양광시스템의 성능과 일반 기상 조건들이 IEC 61724 에 따라 최첨단 측정 플랫폼의 사용과 함께 기록되고 저장된다. 플랫폼은 고 분해능으로 데이터를 저장하는 중앙 데이터 로깅 시스템에 연결된 기상과 전기적 센서를 포함한다. 확보된 데이터는 시스템이 예상한 바와 같이 이행되는지 아닌지를 결정하기 위해 자동적으로 일간 기준으로 처리된다. 그리고 태양광시스템에서의 성능 손실, 고장 및 불량을 확인하기 위해 측정된 것과 시뮬레이션한 DC 출력 생산 사이의 실제 비교를 이행한다.

참고문헌:

- [1] G. Makrides, B. Zinsser, M. Schubert, and G. E. Georghiou, "Performance loss rate of twelve photovoltaic technologies under field conditions using statistical techniques," Sol. Energy, vol. 103, no. October 2016, pp. 28–42, 2014.
- [2] A. Phinikarides, G. Makrides, and G. E. Georghiou, "Estimation of annual performance loss rates of grid-connected photovoltaic systems using time series analysis and validation through indoor testing at standard test conditions," 42nd IEEE PVSC, pp. 1–5, 2015.

**SHORT PRESENTATION
OUTDOOR MODULE TEST FACILITIES**



Universiteit Utrecht

Responsible institution
Copernicus Institute of Sustainable Development (Utrecht University)
Utrecht – the Netherlands
www.uu.nl/copernicus

기반시설 위치:

Utrecht, 네덜란드

소개:

2013 년부터 운영 중인 Utrecht Photovoltaic Outdoor Test facility (UPOT)는 다양한 유형의 상업용과 프로토타입 태양광모듈을 실제 작동조건 하에서 측정하는 시험시설이다. 2018 년에 시설은 약 50 개의 폴사이즈 모듈을 동시에 측정할 수 있도록 확장될 것이다. 이 시설에는 면내 분광 조사강도용 분광복사계뿐 아니라 솔라 트랙커(직달 일사량계와 확산 일사량계와 함께), 글로벌 수평면과 면내 조사강도 측정용 일사량계를 포함한 대형 센서 어레이 장비를 갖추고 있다. 태양광모듈 측정은 개별 모듈별로 IV 트레이서와 온도 측정과 함께 높은 시간 분해능으로 진행된다. 최종적으로 기상 데이터가 측정되고, 그리고 360 도 카메라가 시험시설 주위 전체 상공의 이미지를 촬영한다.

사진:



기술적 세부사항:

모든 측정은 EKO instruments의 IV 트레이서로 진행된다. 확장 후의 측정은 Ljubljana 대학이 개발한 새로운 도구로 수행할 것이다. 측정 사이에 모듈은 FemtoGrid 출력 최적화기(power optimizers)에 의해 MPP에 유지된다. 솔라 트랙커, 일사량계와 기상 스테이션은 PC에 연결된 데이터로거를 통해 제어된다. 분광복사계와 IV 트레이서는 동일 PC에 직접 연결된다. 품질관리 후에 측정결과가 처리되고, MySQL 데이터베이스에 저장된다.

참고문헌:

- [1] W.G.J.H.M. Van Sark, Atse Louwen, Arjen C. de Waal, Boudewijn Elsinga, Ruud E.I. Schropp (2012), UPOT: The Utrecht photovoltaic outdoor test facility, Proceedings of the 27th EUPVSEC, pp 3247-3249
- [2] Louwen, A., de Waal, A. C., Schropp, R. E. I., Faaij, A. P. C., and van Sark, W. G. J. H. M. (2017) Comprehensive characterisation and analysis of PV module performance under real operating conditions. Prog. Photovolt: Res. Appl., 25: 218–232. doi: 10.1002/pip.2848.

부록 3: 영어 - 한글 용어 비교

accredited	인정받은
accuracy	정확성
air mass (AM)	에어매스
albedo	알베도
amorphous silicon (a-Si)	비정질실리콘
angle of incidence (AOI)	입사각
average photon energy	포톤 평균에너지
azimuth	방위각
bankability	은행성
black surface	검은 표면, 흑체판
blueshift	단파장 이동, 청색이동
calibration	교정
characterization	특성분석
clear sky	청명
coloured module	컬러 모듈
combined standard uncertainty	합성 표준 불확도
combined uncertainty	합성 불확도
correction	보정
coverage factor	포함 인자
crystalline silicon (c-Si)	결정질실리콘
damp heat	고온고습
daylight	일광
dector	탐지기
diffuse	확산, 산란
direct normal irradiance (DNI)	법선면 직달 조사강도
elevation angle	고도각
energy yield	에너지 수율
equivalent irradiance	등가 조사강도
error analysis	오차 분석
expanded uncertainty	확장 불확도
external quantum efficiency (EQE)	외부양자효율
failure	불량
fill factor (FF)	충진율
gain	이득
gigawatt (GW)	기가와트
global horizontal irradiance	글로벌 수평면 조사강도
global irradiance (G)	글로벌 조사강도
global normal irradiance (GNI)	글로벌 법선면 조사강도
grating	격자
height angle	고도각
heterojunction (HTJ)	이종접합

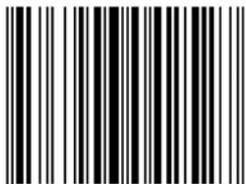
in plane	면내(面內)
insolation	일조량
irradiance	조사강도
irradiation	조사량
IV tracer	IV 트레이서
Key Performance Indicator (KPI)	핵심 성능 지수
leak current	누설 전류
linear performance loss analysis (LPLA)	선형 성능 손실분석
linear regression	선형회귀
maximum power point (MPP)	최대출력점
mechanistic performance model (MPM)	기계론적 성능 모델
metastability	준안정성
metric	지표
mounting rack	설치 랙
multicrystal silicon (mc-Si)	다중결정 실리콘
multi-junction	다중접합
negative temperature coefficient (NTC)	네거티브 온도계수
nominal module operating temperature (NMOT)	공칭 모듈동작온도
off-sun	차광시
on-sun	일조시
open-circuit voltage	개방전압
performance loss rates (PLR)	성능 손실률
performance ratio (PR)	성능비
performance test conditions (PTC)	성능시험조건
Plane of array (POA)	어레이면
polychromator	다색광원기
potential induced degradation (PID)	퍼텐셜 유도 열화
power output	출력 산출량, 출력 생산량
practices	관행
preconditioning	전처리
pyranometer	일사량계
pyrgeometer	야간 복사계
pyrheliometer	직달일사량계
quadrant	4 분면
qualification test	적격성 시험
quantity	양
radiation	복사
radiometer	복사계
random error	우연한 오차
raytracing	광선추적법
real-time data (RTD)	실시간 데이터
reference cell	기준 태양전지, 기준 셀
regression analysis	회귀 분석
relative uncertainty	상대 불확도

resistance temperature detector (RTD)	저항온도 탐지기
scheme	계획
shading	음영, 차광
shading limit angle	음영 한계 각도
sky temperature	천공온도
soiling	오염
sorting	분류
spectral irradiance	분광 조사강도
spectral mismatch (SMM)	분광불일치
spectral response (SR)	분광응답
spectroradiometer	분광복사계
standard test condition (STC)	표준시험조건
sun hours	태양 시간
sweep speed	주사속도
synchronization	동기화
systematic error	계통적 오차
temperature coefficient	온도계수
test facilities	시험설비
thermofile	열전퇴, 서모파일
tolerances	허용 오차
traceability	소급성
tracker	트랙커, 추적기
transient	과도상태
transposition	전위
uncertainty	불확도
wet leakage	습윤누설
zenith angle	천정각

번역 문의: khdb52@gmail.com



ISBN 978-3-906042-52-7



9 783906 042527 >