

International Energy Agency
Photovoltaic Power Systems Programme



기후에 따른 태양광모듈의 등급

: 다양한 태양전지 기술과 다양한 작동 조건

(Climatic Rating of Photovoltaic Modules:

Different Technologies for Various Operating Conditions)

2020

국제에너지기구 태양광발전시스템 프로그램

옮김 윤경훈 한국에너지기술연구원



IEA PVPS TCP 란?

1974년 설립된 국제에너지기구(IEA)는 경제협력개발기구(OECD)의 틀 내에서 회원국들 간의 포괄적인 에너지협력 프로그램을 수행하는 자치기구이다. 기술협력 프로그램(Technology Collaboration Programme: TCP)은 미래 에너지 안보와 지속가능성은 글로벌 협력으로 시작된다는 믿음 하에 만들어진 것이다. 이 프로그램에는 정부, 학계 그리고 산업계의 전문가 6,000명이 참가하고 있으며 공동 연구의 향상과 특정 에너지 기술의 활용에 기여하고 있다.

IEA PVPS(태양광발전시스템 프로그램)는 TCP 의 하나로 1993년에 설립되었다. 프로그램의 임무는 "지속 가능한 에너지시스템으로 전환하는데 태양광에너지가 핵심적인 역할을 하도록 국제협력을 강화하는 것이다. 이를 달성하기 위해 프로그램의 참여자들은 태양광 발전시스템 활용 분야에서 다양한 공동 연구 프로젝트를 수행하여 왔다. 전체 프로그램은 각국 별로 대표 한 명 혹은 기구 멤버로 구성된 집행위원회(Executive Committee)가 관장하고, 여기서 연구 프로젝트나 활동 영역이 될 수 있는 분명한 "Tasks"를 지정하게 된다.

IEA PVPS 참여국은 호주, 오스트리아, 벨기에, 캐나다, 칠레, 중국, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 이스라엘, 이탈리아, 일본, 한국, 말레이시아, 멕시코, 모로코, 네덜란드, 노르웨이, 포르투갈, 남아공, 스페인, 스웨덴, 스위스, 태국, 터키, 미국이다. EC(유럽연합 집행위원회), Solar Power Europe, Smart Electric Power Alliance(SEPA), Solar Energy Industries Association 그리고 Cop-per Alliance 도 역시 멤버들이다.

Visit us at: www.iea-pvps.org

IEA PVPS Task 13 이란?

IEA PVPS 틀 내에서 Task 13은 태양광 구성 부품과 시스템의 가동, 신뢰성 그리고 품질을 향상시키기 위해 노력하는 시장 참여자들에게 관련 지원을 해 주는 것을 목표로 하고 있다. 프로젝트의 범위 내에서 수집한 다양한 기후대에 위치한 태양광시스템의 운영 데이터들은 태양광의 신뢰성과 성능의 현 상태를 추정하는 기반을 제공해 줄 것이다.

Task 13은 광범위한 환경과 활용분야의 태양광시스템 품질, 성능, 신뢰성과 수명에 영향을 미치는 기술적인 측면에 대한 자료를 요약하고 보고하는 공동의 플랫폼을 제공하고자 한다. 함께 국경을 초월하여 협력함으로써 각 회원국으로부터의 연구와 경험들을 모두 활용할 수 있을 것이고 이들 지식들을 결집 종합하여 태양광시스템이 최적의 상태에서 성능을 낼 수 있는 최선의 사례들과 방법들을 발굴하고 그리고 경쟁력 있는 투자 회수를 위해 지속적으로 노력하고자 한다

Task 13은 지금까지 태양광 구성 부품과 시스템의 품질에 대한 지표가 될 수 있는 다양한 파라미터들의 계산에 필요한 올바른 체계를 만들어내 오고 있다. 이런 체계들은 지금 준비되어 있어 산업계에서는 이를 사용할 수 있는데, 이런 수준 높은 보고서들에 포함된 결과에 대해 감사함을 표하고 있다.

IEA PVPS Task 13의 참여국은 호주, 오스트리아, 벨기에, 캐나다, 칠레, 중국, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 이스라엘, 이탈리아, 일본, 네덜란드, 노르웨이, 스페인, 스웨덴, 스위스, 태국 그리고 미국이다.

DISCLAIMER

The IEA PVPS TCP is organised under the auspices of the International Energy Agency (IEA) but is functionally and legally autonomous. Views, findings and publications of the IEA PVPS TCP do not necessarily represent the views or policies of the IEA Secretariat or its individual member countries.

표지 그림

일정한 값을 가진 모듈의 특성값과 모듈의 에너지수율에 영향을 미치는 기후, 설치와 기술 인자들은 푸른색으로, 값이 변하는 모듈 특성값은 녹색으로 표기. Source: TÜV Rheinland/Sören Arndt

ISBN 978-3-907281-08-6: Climatic Rating of PhotovoltaicModules: Different Technologies for Various Operating Conditions



INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME

IEA PVPS Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems (태양광시스템의 성능, 작동과 신뢰성)

Climatic Rating of Photovoltaic Modules: Different Technologies for Various Operating Conditions (기후에 따른 태양광모듈의 등급: 다양한 태양전지 기술과 다양한 작동 조건)

> Report IEA-PVPS T13-20:2020 December 2020

ISBN 978-3-907281-08-6



AUTHORS

Main Authors

Johanna Bonilla Castro, TÜV Rheinland, Cologne, Germany Markus Schweiger, TÜV Rheinland, Cologne, Germany David Moser, EURAC Research, Italy Tadanori Tanahashi, AIST, Japan Bruce H. King, Sandia National Laboratories, USA Gabi Friesen, SUPSI, Switzerland Liu Haitao, Institute of Electrical Engineering, CAS, China Roger H. French, CWRU, USA Laura S. Bruckman, CWRU, USA Björn Müller, Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany Christian Reise, Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany Gabriele Eder, OFI, Austria Wilfried van Sark, University of Utrecht, Netherlands Yaowanee Sangpongsanon, CSSC, Thailand Felipe Valencia, ATAMOSTEC, Chile Joshua S. Stein, Sandia National Laboratories, USA

Contributing Authors

Ana Gracia-Amillo, Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italy Julián Ascencio-Vásquez, University of Ljubljana, Slovenia, now with: 3E, Brussels, Belgium Carolin Ulbrich, PVcomB, Helmholtz-Zentrum Berlin, Berlin, Germany Roland Valckenborg, TNO, Eindhoven, The Netherlands Malte Ruben Vogt, ISFH, Germany, now with: TU Delft, Netherlands James C. Blakesley, National Physical Laboratory (NPL), UK Raymond J. Wieser, CWRU, USA Elías Urrejola, ATAMOSTEC, Chile Dorian Esteban Guzman Razo, Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany

Editor

Ulrike Jahn, TÜV Rheinland, Cologne, Germany

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

Korea Institute of Energy Research (한국에너지기술연구원)



목차

감시	사인사		.7
약0	Ч		.8
요의	₽ 1		10
1	서론		13
	1.1	태양광시스템의 균등화발전단가에서 에너지등급의 타당성과 태양광산업	13
	1.2	태양광모듈 에너지등급 연구에 대한 문헌 검토	14
2	태양	광모듈의 전기적 성능 측정	21
	2.1	옥내 시험 방법 IEC 61853-1	21
	2.2	옥내 시험 방법 IEC 61853-2	26
	2.3	옥외 태양광모듈 특성분석	31
	2.4	IEC 61853-1 매트릭스 데이터세트	42
	2.5	양면형 태양광모듈의 특성분석	44
3	태양	광기술에서의 에너지 기상학	55
	3.1	기후대 시스템과 태양광 특정 기후대 정의	55
	3.2	분광 분포와 태양광 성능	31
	3.3	데이터 포맷과 기준 데이터세트	53
	3.4	아타카마 사막 조건을 고려한 모듈 특성분석	66
4	태양	광모듈의 에너지등급	72
	4.1	IEC 61853-3 에 따름	72
	4.2	태양광모듈 에너지등급 규격 IEC 61853-3 의 실행 라운드 로빈	79
	4.3	축소형 매트릭스 측정	33
	4.4	태양광시스템 에너지 예측에 샌디아 모델의 교정과 적용	97
	4.5	ISE 모델 대 IEC 61853-310)3



	4.6	선형 성능 손실 분석 - 에너지등급 접근법에 대한 대안	112		
	4.7	양면형 태양광모듈의 에너지등급	119		
5	새롭	게 떠오르는 연구 분야들	128		
	5.1	BIPV 모듈의 특수한 작동조건	128		
	5.2	컬러 태양광모듈의 성능	131		
	5.3	에너지등급의 불확도	135		
	5.4	태양광시스템의 대표적인 메타데이터 분석	138		
	5.5	장기간의 열화율: 태국 방콕에 있는 소형 시스템의 사례 연구	141		
6	결론		150		
참고	1문헌		152		
부록	흒 1 도	2델링 검증 데이터세트 ⁻	165		
부록	부록 2 영어-한글 용어 비교167				



감사인사

This paper received valuable contributions from several IEA PVPS Task 13 members and other international experts. Many thanks are due to the following experts for their valuable contributions and support:

- Bas van Aken, TNO, Eindhoven, The Netherlands
- Ewan Dunlop, Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italy
- Nigel Taylor, Joint Research Centre, Ispra (JRC), Italy
- Miguel Ángel Sevillano-Bendezú, PUCP, Lima, Peru.

Many thanks to Ms. Johanna Tillmann from TÜV Rheinland for her support to technical editing of this report.

The editing of Chapter 3.4 was highly supported by María José Riquelme, Jose Alejandro Tapia Jelcic, Jose Galleguillos Alvarado, Erik Mella Cuitiño, and Sebastián Delgado. They are part of the ATAMOSTEC team in charge of placing and keeping the solar desert platform (PSDA) operative. They also contributed with the measurements and data processing that generated the results presented in this chapter. The indoor results were obtained by the team of our partner CEA-INES. Furthermore, the CORFO technological programme ATAMOSTEC, who founded all the tasks associated with the results presented in Chapter 3.4, must be acknowledged.

The round robin summarized in Chapter 4.2 was undertaken by the following researchers: M. R. Vogt, S. Riechelmann, A. M. Gracia-Amillo, A. Driesse, A. Kokka, P. Kärhä, C. Schinke, K. Bothe, R. Kenny, J. C. Blakesley, E. Music, F. Plag, G. Friesen, G. Corbellini, N. Riedel-Lyngskær, R. Valckenborg, M. Schweiger and W. Herrmann.

This report is supported by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) under grant number 0324304A and 0324304B.

It is supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Japan, under contract #15100576-0.

This report is supported by the Swiss Federal Office of Energy (SFOE) under contract no.: SI/501788-01.

Contributions to this document were provided thanks to the work done within the PV-Enerate research project - Advanced PV Energy Rating (Project Number: 16ENG02), cofinanced by EMPIR programme and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

Chapter 3.1 has received funding from the European Union's H2020 programme SOLAR-TRAIN under grant agreement No 721452 and research programme P2-0197 funded by the Slovenia Research Agency.

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

2021년 7월 윤 경 훈 (Yoon, Kyung-Hoon)





약어

AC	Alternating current
AM	Air mass
AOI	Angle of Incidence
APE	Average photon energy
a-Si	Amorphous silicon
BG_{MOD}	Bifacial gain in terms of module DC yield
BG _{OPT}	Bifacial gain in terms of irradiance
BIPV	Building-integrated Photovoltaic (BIPV)
BiFi	Power gain per unit of rear irradiance for bifacial PV modules
BOS	Balance of system
CAPEX	Capital expenditures
CdTe	Cadmium telluride
CIGS	Copper indium gallium selenide
CSER	Climate specific energy rating
c-Si	Crystalline silicon
DC	Direct current
D _{POA}	Diffuse irradiance in plane of array
EQE	External quantum efficiency
ETA	PV module's efficiency
f	Front side of a bifacial PV module. V _{oc,f} , P _{max,f} , I _{sc,fcancel}
FF	Fill factor
G	Global irradiance
G _E	Equivalent irradiance (defined in IEC TS 60904-1-2)
G _{EFF}	Effective irradiance on a bifacial PV module (= $G_{FRONT} + G_{REAR}$)
G _{POA}	Irradiance in the plane of the array (front side, also G_{FRONT})
G _{rear}	Rear side irradiance
GPP	Green public procurement
GW	Gigawatt
HTJ	Heterojunction technology
	Current in amper (A)
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IMPP	Current at maximum power point



lsc	Current under short-circuit conditions. The peak current a solar panel can produce with its output shorted.
ITO	Indium tin oxide
I-V	Current voltage characteristic
KG/KGC	Köppen-Geiger climate zone (s)
KGPV	Köppen-Geiger-photovoltaic
LCOE	Levelised cost of Electricity
LPLA	Linear performance loss analysis
MPP	Maximum power point
MPR	Module performance ratio
r	Rear side of a bifacial PV module. $V_{OC, r}$, $P_{max, r}$ and $I_{sc, r}$
PSDA	Plataforma Solar del Desierto de Atacama
POA	Plane of array
PV	Photovoltaic
PR	Performance ratio
RTD	Real-time data
SR	Spectral response
SMM	Spectral mismatch
T/C	Thermocouple
T _{AMB}	Ambient air temperature
TOC	Total ozone column
UV	Ultraviolet radiation
UVA	UV-A radiation
UVB	UV-B radiation
V _{WIND}	Wind speed



요약

태양광 에너지등급(energy rating)은 태양광모듈의 에너지수율 성능을 그 대상으로 한다. 온도 25°C, 조사강도 1000 W/m² 및 AM1.5 스펙트럼의 표준시험조건(STC)이라는 단일 작동점 하에서의 성능에만 관련되는 출력등급(power rating)과 달리, 에너지등급은 생산되는 에너지의 양에 영향을 미치는 모듈의 여러 가지 특성 값들 - a) 낮은 조사강도에서의 거동 b) 온도 거동 c) 분광응답 d) 각도응답 - 을 고려한 것이다. 이들 특성 값들은 역시 기후와 지역 조건의 함수로 시간에 따라 변하고 STC 와는 그 차이가 대단히 크다. 태양광 산업계와 시장 참가자들에게, 태양광 모듈과 시스템이 얼마나 많은 에너지를 생산하는지에 대한 정확한 정보는 매우 중요하고 출력등급보다는 훨씬 더 의미가 크다. 최근 태양광산업은 출력(watt-peak)으로부터 에너지(kWh)를 생각하는 쪽으로 방향을 돌리고 있는데, 당연히 에너지등급을 더 중요시 하고 있다. 이 보고서 1 장에서는 에너지 분류법의 중요성을 좀 더 자세하게 검토하고 이 분야에서의 최근 개요를 소개한다.

에너지등급은 통상적인 설치 장소에서 그 성능에 따라 모듈 간의 차별화를 가능하게 하고자 하는 것이 목적이다. 이런 이유로 태양광산업에서 가장 중요한 국제적인 표준화 기구인 국제전기기술위원회(IEC)에서 "*태양광모듈 성능시험과 에너지등급*" 규격인 IEC 61853(Parts 1~4)를 제정하였다. 이 시리즈 규격은 태양광모듈의 옥내와 옥외 특성분석 및 기후특성에 따른 에너지등급(climate-specific energy rating: CSER)에 관한 가이드라인과 표준 절차를 제공하고 있다. CSER 은 특정 기후에서 태양광모듈의 연간 성능비와 같은 의미이다.

Part 1은 다양한 조사강도와 모듈온도(조사강도-온도(G-T) 혹은 출력 매트릭스) 하에서 모듈의 성능측정을 다룬다. Part 2는 태양광모듈의 각도응답(AR), 분광응답(SR) 및 공칭 모듈 작동온도(NMOT)의 측정절차를 기술하고 있다. Part 3에서는 CSER 값 계산의 방법론을 설명하는데, 입력 데이터로 Parts 1, 2 및 4(기준 기후 데이터세트)의 결과를 사용하고 있다. 현재 6 개의 기후 데이터세트(온대 대륙, 온대 해안, 적도 습한, 아열대 건조, 아열대 해안, 고지대)가 제공되고 있는데, 이 모두는 일년 전 기간에 걸쳐 시간별 기상 파라미터를 포함하고 있다.



그림 1: 기후특성에 따른 에너지등급 시험용 IEC 61853 시리즈 규격의 방법론(Source: TÜV Rheinland Group).



IEC 61853의 Part 1과 2는 2 장에서 논의하고자 한다. 특별히, 2.1과 2.2 장은 솔라 시뮬레이터를 사용한 옥내 측정절차를 간략하게 기술하고 있는데, 이는 태양광 산업계에서 가장 흔한 관행이다. 옥외 측정절차도 역시 이 규격에 개략적으로 기술되어 있는데, 이 방법은 무엇보다도 실제 작동 중의 열적 상태를 완전하게 활용할 수 있는 것이 장점이다. 여기에 대해서는 2.3 장에서 논의한다. 2.3.1절은 옥외 설치 조건에서 2-축 태양 추적장치를 사용하여 모듈의 특성을 측정하는 방법을 소개하고 있다. 2.3.2절에서는 최적이 아닌 기상 조건의 기간을 포함하여 일년 전 기간의 옥외 데이터로부터 IEC 61853-1 매트릭스의 추출에 필요한 지속적인 공동협력 상태를 유지하기 위한 도전과제에 대해 언급한다. 실제적인 목적에서, 2.4 장은 인정받은 한 시험소에서 IEC 61853 규격에 따라 시험한 9개 태양광모듈의 온라인 데이터세트에 대한 이해도를 높이는데 대해 기술하고 있다. 에너지(kWh)에 대한 새로운 인식은 에너지등급의 역할을 증대시켰을뿐 아니라 양면형 태양광모듈과 같은 신기술이 시장에 진출하는 데에도 기여를 하였다. 이런 과정을 통해 새로운 측정절차들이 개발되었다. 2.5 장에서는 양면형 모듈의 출력 산출량 특성분석의 현황에 대해 소개한다.

기후 분류와 기후가 태양광기술의 성능과 열화에 미치는 영향을 이해하려는 노력 없이 에너지등급을 논의하는 것은 불가능하다. 따라서 3 장은 태양광 기술들의 에너지 커버한다. 3.1 장에서는 태양광 커뮤니티를 지원하는 가장 기상학을 유명한 스킴(scheme)인 Köppen-Geiger(KG) 기후 분류에 대해 논의하고 그리고 추가적인 태양광 관련 기후 변수들(전 조사강도, 자외선 조사강도, 풍속)을 포함하는 기타 접근방법들을 소개하고 있는데, 태양광 열화 기후대(Photovoltaic Degradation Climate Zones: PVCZ), Köppen-Geiger-Photovoltaic (KGPV) 및 옥내에서의 노화 시험(Project Infinity)이 대상이다. 조사강도와 온도 외에도 분광 분포는 주어진 태양광기술의 성능에 미치는 주요 영향 인자의 하나인데, 특정 지역의 분광 분포가 IEC 60904-3에 정의된 글로벌 분광 조사강도의 기준과는 다르기 때문이다. 3.2 장에서는 이 문제를 논의한다. 3.3 장에서는 IEC 61853-4에 의해 제시된 데이터세트를 평가하는데, 여기에는 일년 전 기간의 시간별 주위온도, 풍속, 글로벌 수평면 조사강도와 광대역(broadband) 직달 조사강도, 면내(in-plane) 글로벌과 광대역 직달 조사강도를 위성으로 검색한 데이터과 29개의 분광 밴드를 적분한 스펙트럼 분석 면내 글로벌 조사강도가 포함된다. 특별한 기후 조건을 정규화하는 어려움에 대한 개요 설명을 위해 3.4 장에서는 Atacama Desert 의 경우를 소개한다. 이처럼 가혹한 기후(즉, 자외선 조사)에서 작동하는 태양광모듈에 필요한 종합적인 특성측정에 대해 논의한다.

4 장은 이 보고서의 핵심으로 CSER 결정에 필요한 IEC 방법론을 상세히 설명하고, 유명한 태양에너지연구소들이 설정한 기존의 접근방법과 관행들도 함께 설명한다. 4.1 장은 IEC 61853-3 방법론을 사용한 CSER 파라미터 계산을 단계별로 기술한다. 에너지등급용의 방정식과 절차가 주어지더라도 실제 이행은 여전히 도전적이다. 4.2 장에서는 10 개 태양에너지연구소간의 라운드 로빈 결과를 소개하며 이 문제에 대해 언급한다. 동일한 태양광모듈 시험소 입력데이터(IEC 61853의 Part1과 2)를 사용하여, 각 연구소들이 CSER 을 계산토록 요청받았다. 여러 번의 조정 작업과 크게 벗어난 값들을 배제하는 등의 작업을 거쳤음에도 참여기관 사이에 CSER 값의 차이는 여전하다.

옥내 혹은 옥외 측정과 관련하여, 실용적인 측면에서 결정을 내리는데 중요한 역할을 하는 몇 가지 인자들이 있는데, 비용, 시간과 정확도이다. G-T 매트릭스에서 측정수의 감소 및 등급의 정확도에 대한 영향에 대해서는 4.3 장에서 논의한다. 이 측정수 감소는 비용을 완화하는 대안일 뿐 아니라 시험 장비가 조사강도 혹은 온도 설정의 한계 때문에 전체 매트릭스의 측정이 어려울 때 하나의 해결책이 될 수도 있다.

에너지등급에 대한 필요성 때문에 태양에너지연구소들이 자체적으로 여러 방법과 절차들의 개발에 참여하게 되었다. 그 중 일부는 이 절에서 논의한다. 4.4 장에서는



샌디아 어레이 성능 모델(Sandia Array Performance Model: SAPM)을 소개하는데, 이는 4 개의 주요 방정식으로 구성된 반경험적인 세트이다. 적절하게 교정이 되면, STC 에서의 모듈 성능을 나타내는 일련의 계수들에 필요한 옥외 데이터를 줄여주고, 이 계수들은 옥외 데이터를 IEC 61853-1 G-T 매트릭스로 전환시키는데 사용할 수 있고, 에너지 예측이나 등급 수행하는데 표로 나타낸 기상 데이터와 결합시킬 수 있다. 4.5 장에서는 Fraunhofer ISE (Dirnberger et al. method)의 접근 방법을 소개하는데, 이는 확장시킨 시험소 측정 대신에 가용한 역사적 데이터와 태양광모듈의 기술적 데이터시트에 의존한다.

4.6 장은 TÜV Rheinland 의 선형 성능 손실 분석(Linear Performance Loss Analysis: LPLA)을 소개한다. 이 방법은 IEC 61853의 Part 1과 2의 측정, 옥외에서 실제 측정을 통해 확보한 기후 데이터세트 및 다양한 기상 인자들의 선형 중첩(linear superposition)으로 모듈의 성능비를 계산하는 방정식을 필요로 한다. IEC 에너지등급의 범위는 단면형(monofacial)과 단일접합 태양전지 소자를 커버하는데, 이를 양면형 소자에까지 쉽게 적용할 수는 없다. 4.7 장에서 이 이슈와 2 개의 양면형 모듈 표준 설치 조건(standard mounting conditions: SMC)의 제안에 대해 논의한다.

5 장은 에너지등급을 다른 유망한 태양광기술, 예를 들면 건물일체형 태양광(buildingintegrated photovoltaic: BIPV)과 컬러 모듈 등에 적용하는 등의 이슈를 다룬다. 이 보고서 전체에 걸쳐 분석은 시스템 수준보다는 모듈 수준에서 유지하고 있는데, 중요성을 감안하여 뒤에서는 태양광시스템 이슈에 대해 논의한다. 5.1 장은 7개국에서 9개 기관이 참여한, BIPV IEC 61853에 따른 라운드 로빈 시험 결과를 소개하는데, 이 시험은 IEA PVPS Task 15.1의 틀 내에서 추진된 것으로 여기서는 모두 동일한 모듈, 같은 시험측정 방법 및 전세계적으로 합의된 방법론을 사용하였다. 5.2 장에서는 SUPSI PVLab 이 수행한 일년 기간의 연구결과를 소개한다. 이 연구에서는 서로 다른 컬러의 7개 프로토타입 모듈이 평가되었는데, 그 목적은 다양한 태양광기술의 실제 성능에 미치는 기후 인자들에 대한 이해를 높이는 것이다. 여타 모델과 같이, IEC 61853 에너지등급 역시 시스템 측면과 무작위 오류로 인한 불확도를 가지고 있는데, 그 요인은 입력 데이터와 적용 모델로부터이다. 불확도의 주요인에 대해서는 5.3 장에서 논의한다.

태양광의 성능은 정적 메타데이터(즉 방위각, 기울기)와 동적인 기상데이터에 따라 달라진다. 지역별 시스템에 대한 전체 성능데이터를 확보하는 것과 관련하여, 5.4 장에서는 연간 성능데이터를 찾는 것보다 더 좋은 접근방식은 태양광시스템 메타데이터(모듈 기울기와 방위각, 설치용량)를 확보하고 그리고 연 단위로 변화하는 기상 정보를 토대로 한 특정 연간 성능 분포를 계산하는데 지역적으로 대표성이 있는 분포를 사용하는 것임을 보여주고 있다. 이 접근법은 국가 에너지계획 수립의 개선에 기여하고, 설치를 최적화하고 그리고 통상적인 지역 설치 관행에 대한 특정 정보를 제공한다. 가장 큰 의문점은 에너지등급이 태양광모듈과 시스템의 장기 운영에 어떤 종류의 정보를 가지고 있는가 하는 것이다. 이를 위해서는 에너지등급, 에너지수율 및 장기 성능평가 사이의 차이점을 이해하는 것이 중요한데, 이 점은 5.5 장에서 논의한다. 이 장에서는 태국에서의 사례연구를 통해 태양광모듈의 장기 열화를 다룬다.

전반적으로 이 보고서는 에너지등급의 현황에 관한 개요서로, 태양광기술과 기후에 대한 입력데이터(옥내나 혹은 옥외 측정)부터 기존 시험방법(IEC 61853과 다른 태양에너지연구소)의 설명과 평가를 망라한다. 이런 방법들을 양면형 모듈, BIPV 및 컬러 모듈 같은 신기술에 적용하고, 불확도에 대한 각 방법들의 경쟁 그리고 시스템 수준에서의 평가에 대한 공개 논의의 장을 연 것이다. 개별 독자들이 분석하는데 필요한 기본 데이터세트 역시 제공된다.



1 서론

태양광모듈에 의한 에너지생산은 수명기간 동안의 설치 환경 조건에 따라 달라진다. 통상적으로 태양광모듈은 STC 에서 시험하는데, 여기서의 전기적 효율을 흔히 그 성능을 좌우하는 결정적인 지표(indicator)로 받아드린다. STC 에서의 등급은 서로 다른 태양광기술의 성능을 비교하는 데 유용하다. 그 시험조건은 실험실 환경에서 쉽게 재현할 수 있지만, 장기간의 운영을 통해 얼마나 많은 에너지를 생산할 수 있는지에 대한 정확한 정보를 제공할 수는 없다. 설치 현장에서의 전력 생산은 주로 조사강도, 태양전지 온도, 분광응답 및 태양 입사각에 따라 달라지는데, 이들 조건들은 일간, 계절간의 시간 변화, 설치위치와 기후조건의 함수들로서 STC 조건들과는 크게 차이가 난다. 제조업체들은 EPC 계약자들이 태양광시스템의 성능을 최적화할 수 있는 다양한 조건을 선택할 수 있도록 최적화된 태양광모듈을 설계해야 한다. 소비자 혹은 투자자 입장에서는 태양광모듈의 에너지등급이 출력등급보다 더 중요하다. 모듈의 에너지등급은 하나의 표준 기후조건에서 연간 kWp 당 생산된 직류 에너지의 추정치로 정의할 수 있다. 에너지등급은 소비자들이 서로 다른 제조업체가 생산한 유사 제품뿐 아니라 완전히 다른 기술의 제품들까지 비교할 수 있게 해준다. 해당하는 설치 지역에서의 실제 추정 에너지 값을 제공할 수 있어야 하고, 그 계산에 필요한 방법도 간단하고 정확하고 반복할 수 있고 그리고 합의된 것이어야 한다.

에너지생산 측면에서 태양광모듈의 성능에 영향을 미치는 모든 변수들을 포함시키기 위해, 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission: IEC)는 4 개의 Part 로 구성된 규격 IEC 61853를 제정하였다. IEC 61853-1은 조사강도와 온도가 출력 등급에 미치는 영향에 대해, IEC 61853-2는 조사강도, 주위 온도 및 풍속으로부터 모듈 온도를 추정하는 것과 함께 분광응답, 입사각과 모듈 작동온도 측정 절차를 다루고, IEC 61853-3은 태양광모듈의 에너지등급에 대해, IEC 61853-4는 에너지등급 계산에 사용될 수 있는 표준기간(standard periods)과 기상조건을 설명하는 기후데이터를 다룬다.

1.1 태양광시스템의 균등화발전단가에서 에너지등급의 타당성과 태양광산업

앞에서 언급한 바와 같이 태양광 설치와 파이낸싱 측면에서 작동 기간동안 생산된 에너지는 어떤 경제적인 지표를 계산하는데 필요한 핵심 입력요소이다. 동일한 기후조건에서 서로 다른 태양광발전소로부터 생산된 전기에너지의 단가는 균등화발전단가(Levelised Cost of Electricity: LCOE)를 사용하여 벤치마킹할 수 있다. 계산하는데 있어 중요한 파라미터들 중, 경제·재정적인 성격으로는 LCOE 를 자본코스트(Cost of Capital: COC), 설비투자(Capital Expenditures: CAPEX) 및 운전비용(Operational Expenditures: OPEX) 등이, 기술적인 성격으로는 수명, 이용률, 열화 등이 있다. LCOE 값은 태양광 프로젝트가 수익성이 있느지 또는 다른 프로젝트(예: PPA 입찰)와의 비교를 위해 사용된다. 그러나 태양광모듈은 STC 에서 측정한 출력에 따라 등급이 매겨지고 판매가 되는 것이지, 수명기간 동안의 에너지생산에 기반하지 않는다. 이러한 이유로 과학자들은 STC 출력보다는 생산하는 에너지(혹은 에너지수율)에 따라 태양광모듈의 등급을 매기는 절차개발에 노력하여 왔다. 이런 절차들을 통상 "에너지등급"이라고 한다. 에너지등급의 목적은 특정 설치장소별로 수율에 따라 태양광모듈간의 차이를 확실하게 하여 사용자들이 그들의 목적에 적합한 최적의 모듈 유형을 선택하게 하기 위함이다. 일련의 IEC 61853 규격은 출력(watts), 에너지(watt-hours)



및 성능비(performance ratio)를 토대로 한 "태양광모듈의 성능을 평가할 수 있는 IEC 요건"을 제정하는데 그 목적을 두고 있다. IEC 요건들은, 입사각(AOI) 효과, 분광응답 및 작동온도 측면에서 서로 다른 기후 지역들과 태양광모듈 수준에서의 표준 성능평가에 적합한 표준 기상데이터세트를 정의하는데 있어 초기 수율 평가 동안에 필요한 사항을 지원할 것이다.

에너지등급 방법론은 이미 태양광모듈 및 시스템과 관련한 Ecodesign, Energy labelling, EU Ecolabel, Green Public Procurement(GPP) 요구조건에 대한 실행가능성을 타진하는 예비연구에 의해 제시된 추천에서도 역시 성공적이라고 증명된 바 있다 [1]. 특히, Ecodesign 에서 제시된 요건은, EU 에서의 3 개의 기준 기후대 각각에 대해 kWh/kWp 로 나타낸 모듈 에너지 생산(수율)과 IEC 61853-3에 따라 계산된 모듈의 전기적 수율에 관한 요건은 조만간 제조업체들에 의해 공표될 것이다.

수율 평가 시의 불확도(Uncertainties in Yield Assessments)[2]에 관한 보고에서는, 수율 평가에 초기 가정이 중요하다고 보여준 바 있는데, 데이터 입력에서의 선택과 P50/P90 값들의 예에서와 같이 초과 확률에 매우 중대한 영향을 주는 모델링 단계들이 그 대상이다. 이는 내부 축적 지식과 특정 기후와 기술에 대해 각 수율 평가자가 가진 기량이 중요하다는 것을 확실하게 보여주는 지표이긴 하지만, 입찰자들과 경쟁하거나 투자자/태양광 프로젝트의 핵심 요구가 최선의 태양광모듈기술 선택에 한정되어 있는 경우에는 태양광모듈의 에너지생산을 평가할 때 표준화 접근방식을 사용하는 것이 유리할 것이다.

위에서 언급한 모두 고려사항을 감안한 결과, 태양광모듈 선택 기준은 출력기준 등급에서 기대수명과 예상 수율을 기반으로 보다 더 정확하며 기후 특성을 고려한 등급(예를 들면 에너지 기반 등급 혹은 에너지등급)으로 전환되어야 한다. 결론적으로 에너지등급에 대한 이해가 깊으면 다음과 같은 여러가지 이득이 있다.

- 제조업체들은 특정 기후에서 그들 제품이 어떤 성능을 나타내는지 보여줄 수 있고 프로세스의 비용 최적화가 가능하다.
- EPC 와 수율 평가자들은 태양광모듈의 기후 의존 거동을 더 잘 이해함으로써 보다 정확한 수율 평가와 수명기간의 수율 예측을 할 수 있게 된다.
- 정책입안자와 규제기관은, 에코설계 요건의 예에서와 같이 수명기간 전기 수율에 대해 보다 정확한 계산방법을 도입할 수 있다.

1.2 태양광모듈 에너지등급 연구에 대한 문헌 검토

서로 다른 기후조건에 설치된 태양광모듈의 연간 성능을 실제적으로 추정하기 위해, 태양광모듈 에너지등급(MPR)은 지난 20여년의 논의를 거쳐 IEC 가 발간한 국제규격에서 "기준 기후 프로파일용의 정규화시킨 에너지 수집(normalized energy collection for the reference climatic profile)"으로 정의하고 있다. MPR 은 이들 규격 (IEC 61853-1, -2, -3, -4)에서 기후 특성에 따른 에너지등급(climate-specific energy rating: CSER)으로 인용되고 있다. 즉, MPR(CSER)은 기준 기후조건 하에서 예상되는 최대 생산(watt-hours) 대비 실제 태양광모듈 생산(watt-hours)의 비를 나타내기 위한 무차원의 지표이다. CSER 파라미터는 출력등급 데이터(다양한 온도와 면내 조사강도 세기에서 얻은 성능 데이터를 포함하는), 입사광의 특성(입사각, 스펙트럼)과 모듈의 온도에 의존하는 태양광 성능데이터 및 주위 온도, 풍속과 조사강도 특성값을 포함하는 시간별 기상 데이터세트로부터 계산한 것이다. 이전 보고서에서 기술한 바와 같이[8], 다양한 위치/기술에서 관찰한 실제 MPR 과 각기 계산한 MPR 사이의 차이를 명확하게 하기 위한 일부 접근방식이 제시된 바 있다[9].



여기서는 다양한 태양광기술과 기후조건 하에서 MPR 에 관한 특징을 추출하기 위해 발간물에 보고된 MPR을 수집하고 메타 분석하였다.

1990년대 이후 다양한 설치 위치에서 다양한 기술을 사용한 태양광모듈의 에너지수율에 대해 100 편 이상의 문헌이 확인되었다(2000년 이전 발간물은 문헌 [10]에서 요약). 주제어로 사용한 단어들(예: photovoltaic* × "performance ratio*" × "에너지수율*")을 조합하여 문헌 데이터베이스를 조사하였다. 대부분의 보고서에서 성능 특성분석은 설치된 태양광모듈에 부착된 라벨로부터만 채택한 것으로 옥외 설치 전에 실제로 결정되거나 혹은 측정(시험실에서)된 것이 아니다. 이들 보고서들은 개별 위치에서의 실제 에너지수율과 높은 조사강도 조건과 같은 특정 상황에서의 성능비를 명확히 할 수 있는 귀중한 추정값을 제공하지만, 순조롭지 않은 조건(예: 낮은 조사강도 조건)에서 수집된 데이터에 의존하는 경우에는 MPR 을 정확히 추정할 수 없었다. 모든 발간물 중 5 개의 보고서 조사를 통해 MPR 특징을 메타분석하였다. 여기에는 남아시아(South Asia), 북아메리카(North America), 중동(Middle East) 및 유럽(Europe)의 에너지등급 데이터가 포함되어 있다(표 1) [11–15].



국가	도시	위도	경도	KG 기후*	참고문헌
UK	near Glasgow	56.00	-4.00	Cfb	[13]
UK	Norwich	52.70	1.09	Cfb	[11]
Netherlands	Utrecht	52.10	5.20	Cfb	[12]
Germany	next Berlin	52.00	14.00	Cfb	[13]
Germany	Cologne	50.92	6.99	Cfb	[14]
Germany	Breisach	48.00	7.59	Cfb	[11]
Italy	near Milano	45.00	9.00	Cfa	[13]
France	near Avignon	44.00	5.00	Csa	[13]
Italy	Ancona	43.47	13.07	Csa	[14]
India	Gurgaon	28.62	77.07	Cwa	[15]
Spain	near Ubeda	38.00	-3.25	BSk	[13]
India	Leh	34.15	77.56	BWk	[15]
USA	Tempe	33.42	-111.91	BWh	[14]
Egypt	Rafah	31.20	34.30	BWh	[13]
India				B**	[15]
India	Chennai	12.98	79.99	Aw	[14]
India				A**	[15]

표 1: MPR 추정을 위해 문헌에서 선택한 위치.

*KG 기후는 Köppen-Geiger 기후 분류에 정의된 기후대를 의미한다[16].

**이들 기후대는 문헌 [15]에서 B 는 "덥고 건조(Hot & Dry)" A 는 "덥고 습한(Hot & Humid)", 기타 기후대는 문헌 [16]에 설정되어 있다. 관련 웹사이트는 [17].





17





그림 2: 각 위치에서의 기상데이터를 토대로 옥내 측정으로부터 추정한 MPR 의 차이. 기후대(열대, 건조 그리고 온대)는 Köppen-Geiger 기후 분류에서 정의한 기후대 (각각 A, B, C)에 대응한다. 반투명한 색으로 나타낸 바들은 옥외 관찰이 없는 데이터를 나타낸다(Source: Adapted from [11–15]).



MPR 은 주로 2 가지 인자(조사강도와 온도)에 따라 크게 달라진다. 태양광모듈에서의 에너지생산은 조사강도(그림 2에서 LowG) 뿐 아니라 분광 불일치(그림 2에서 MMF)와 입사각(AOI)에 의해 크게 영향을 받는다. 태양광모듈의 온도는 주위온도, 풍속과 조사강도의 영향을 받고, 에너지 생산은 각 태양광기술의 온도계수에 따라 변한다.

그림 2는 4가지 태양광기술에 대해 보고된 MPR 에서의 차이(AMPR)를 요약한 것이다 [12-15, 18], ΔMPR 은 각 위치에서의 기상데이터를 토대로 옥내 측정데이터(출력 등급과 기타 특성값)로부터 추정한 것이다. 각 보고서에서의 실적 외에 MPR 특징에 대한 일부 공통점이 그림 2에 나타나 있는데, 예를 들어, 결정질실리콘(c-Si) 모듈에서는 SUM ΔMPR(오염에 의존하는 부분 제외)이 데이터 출처와는 무관하게 각 기후대에서 거의 일정하다. MPR 에서의 이런 편차는 주로 각 지역 온도의 차이에 기인하는데, 실제로 "덥고 건조" 와 열대 기후대에 설치된 태양광모듈의 온도에 의해 발생한 ΔMPR 은 온대 기후대에서 발생한 값의 약 2배이다. 태양광기술과 무관하게 온도의 영향은 더운 기후에서 더 크다. AOI 가 ΔMPR 에 미치는 영향은 기후와 태양광기술과 무관하게 유사한 수준이다. 그리고 태양광기술에 따라 분명한 차이는 있으나, 낮은 조사강도가 MPR 에 미치는 영향은 거의 일정하다(긍정적 영향). 분광 불일치(SMM) 효과에 의해 긍정적인 방향으로 편차가 많이 발생한 것이 비정질실리콘(a-Si)과 CdTe 모듈에서 관찰되었는데, 특히 "덥고 건조" 와 열대 기후대에서 현저하게 나타난 점을 주목해야 한다. SMM 에 의해 기타 태양광모듈에서 작은 긍정적 효과도 탐지가 되었는데(Tempe 지역에서는 네거티브 효과가 탐지되었지만 그 추정 원인은 알지 못하고 있음), 그 강도는 태양광모듈이 설치된 기후대에 대한 의존성은 없다.



그림 3: 각 기후대에서 4가지 태양광기술 사이의 MPR 차이 (Source: Adapted from [11–15]).

이처럼 MPR 은 다양한 기후조건에서의 특정 태양광기술의 성능뿐 아니라 특정 기후대에서 다양한 태양광기술의 성능을 실제로 추정할 수 있게 해주는 도구이다. 이런 관점에서, 4가지 태양광기술을 사용한 모듈의 ΔMPR 를 2개의 기후대 (덥고 건조(B)와 온대(C)) 사이에 비교하였다. 그림 3에서와 같이, 비록 덥고 건조 기후대에서는 결정실리콘과 CIGS/CIS 모듈의 ΔMPR 이 약간 크긴 하지만, 온대 기후대에서는 4가지 태양광기술 사이에 유사한 ΔMPR 가 확인되었다. c-Si 와 CIGS/CIS 모듈에서 ΔMPR 값이 큰 것은, 모든 태양광기술에서 발견되는 기타 환경 인자들(온도, 낮은 조사강도 및 입사각)의 공통 효과들(그림 4)과는 달리 a-Si 와 CdTe 모듈에서는 SMM 의 긍정적 효과가 없기 때문이다. 그러나 이들 결과들은, 이전 보고서에서 논의한 바와 같이 어느 정도의 불확도를 가진 발간된 데이터들로부터 파생된 것이라는 점을



주목해야 한다[8].



그림 4: 환경인자들이 MPR 에 미치는 영향. 수평축의 A, B, C 는 Köppen-Geiger 기후대(열대, 건조, 온대)이다. (Source: Adapted from [11–15]).

MPR 에서의 불확도는, 희망하는 조사강도와 온도에서 성능을 추정하는 절차에서의 불확도뿐 아니라 측정한 환경 데이터, 출력등급 데이터 및 유효 조사강도와 모듈온도의 추정에 따라 달라진다. 이들 불확도를 줄이기 위해 많은 접근방식들이 보고되었는데 [18-장에서는 약간의 진보된 절차에 대해 소개하고자 331. 다음 한다. 그리고 에너지등급에서의 불확도를 줄이기 위해서는 옥외노출 중의 열화 효과도 고려되어야 한다는 점이 제시되었다[11,15,34], 불확도 외에 기후 분류도 기존의 Köppen-Geiger 기후대로부터 개선이 있어야 하는데, 이 기존 분류의 정의는 주어진 기후 분류 지역에서의 식물 성장에 특화된 것이기 때문이다. 최근 태양광 성능을 위한 기후 분류와 관련하여 에너지등급에 관련되는 인자들을 토대로 한 2 가지 제안이 있었다[35-38]. 에너지등급과 관련하여 이들 새로운 분류시스템은 태양광기술과 기후대 사이에 명확한 상호관계를 제공할 수 있을 것이다.



2 태양광모듈의 전기적 성능 측정

다양한 작동 조건에서 태양광모듈의 전기적 성능은 옥외 자연 태양광 하에서(2.3 장 참조) 혹은 인공광원(그림 5)을 사용하여 옥내에서 측정할 수 있다.



그림 5: 태양광모듈 측정용 솔라 시뮬레이터. 좌: 펄스형, 우: 정상상태 (Source: TÜV Rheinland Group).

태양광모듈 전기적 성능 등급은 대부분의 경우, 25°C, 1000 W/m² 및 AM1.5 스펙트럼의 STC 에서 측정한 전류, 전압과 최대 출력의 세트로 나타낸다. 자연 태양광 하에서의 시험조건은 제어할 수 없기 때문에 성능 측정용으로 솔라 시뮬레이터를 사용하는 것이 태양광 산업계에서 가장 흔한 관행이다. 그러나 옥외 측정용 절차도 국제 규격 내에 함께 마련되어 있다(2.3 장 참조).

규격 IEC 61853의 Parts 1과 2는 에너지등급에 관련된 성능 측정의 가이드라인을 제공하고 있는데, 그 개요를 소개하고자 한다.

2.5 장에서는 양면형 태양광모듈의 성능 측정에 대한 기존 절차에 대해 논의할 것이다.

2.1 옥내 시험 방법 IEC 61853-1

2.1.1 낮은 조사강도에서의 거동

조사강도를 달리하여 성능을 측정하기 위해 사용하는 광원은 펄스형이나 혹은 정상상태의 솔라 시뮬레이터이면 된다. 에너지등급 규격의 Part 1에 명시된 것과 같이[3] 조사강도를 100~1100 W/m² 범위에서 변화시키기 위해서는(그림 6 참조), 분광 조사강도 조건을 일정하게 유지하고 그리고 솔라 시뮬레이터의 규격[39]에 기술된 것과 같이 각 세팅에서 조사강도의 균질성에 관한 요구 사양을 충족시킬 수 있는 특별한 주의가 요망된다. 실제로, 이런 요구조건은 광원과 시험 시료 사이의 거리를 변화시킴과 함께 중성 격자 필터(neutral grate filters)를 사용하여 충족할 수 있다. 유리 필터를 사용하거나 혹은 시뮬레이터의 출력을 줄이게 되면 분광 분포에 영향을 미치고, 측정에서 부정적인 아티팩트를 유발할 수 있다.



(1)



그림 6: 클래스 A+A+A+ 솔라 시뮬레이터를 사용하여 7 개의 조사강도 하에서 측정한 결정질실리콘 태양광모듈의 I-V 곡선 (Source: [40]).

이 측정의 주목표는 조사강도에 따른 시료의 효율이 어떤 비선형 관계임을 결정하는 것이다. 낮은 조사강도에서의 거동(그림 7d 참조)은 다음과 같이 계산한다.

$$\eta_{\text{Rel.}} = (P_{Max,Meas}, 1000W / m^2) / (G_{Meas}, P_{Max,1000W / m^2}).$$

낮은 조사강도에서의 성능은, 태양전지 기술보다는 주로 제조 프로세스와 태양광모듈 설계에 의존한다. 일반적으로 바람직한 것은 낮은 조사강도에서의 손실을 줄일 수 있도록 병렬저항은 높게, 전류값이 높을 때 손실을 줄일 수 있도록 직렬저항은 낮게 하는 것이다. 성능은 태양광모듈 유형에 따라 크게 달라지므로 시험소에서 반드시 시험할 필요가 있다. 조사강도 100 W/m² 에서는 80~100 % 사이의 값이 관찰되었다. 100 W/m² 에서 성능이 양호한 시료의 경우는 95 %이다. 효율 곡선이 더 높을수록 특정 에너지수율(kWh/kW_p)이 더 좋아진다.





Irradiance G [W/m²] 그림 7: 7 개 수준의 조사강도 하에서 측정한 결정질실리콘 태양광모듈의 I-V 곡선 (Source: [40]).

2.1.2 온도 거동

서로 다른 온도에서 전기적 성능을 측정할 때 소자 온도를 균질하고 안정하게 유지하기 위한 특별한 주의가 필요하다. 실제로 에너지등급 규격의 Part 1에 명시된 것과 같이[3], 15~75°C 의 모듈온도는, 솔라 시뮬레이터 터널 내로 연결되는 챔버를 가열시키면서 조절할 수 있다. 온도 그 자체는 규격에 기술된 바와 같이, 4 개의 Pt100 혹은 적외선 센서 값을 평균하여 측정한다. 이 측정의 목표는 소자의 성능이 온도에 의존하는지를 결정하는 것이다(그림 8 참조).

23





그림 8: 조사강도 1000 W/m²에서 7 개 온도에서 측정한 결정질실리콘 태양광모듈의 I-V 곡선 (Source: [40]).

 P_{Max} 의 온도계수를 γ 라고 부르는데, 이 값은 네거티브(-%/K)이다. 온도계수는 다음 식과 같이, 25°C 에서 출력 P_{STC} 로 정규화시킨 선형회귀(linear regression)의 기울기 γ_{abs} (W/K)로부터 계산된 것이다.

 $P(T) = \gamma_{abs}T + b;$ $\gamma = \gamma_{abs}/P_{STC}.$

(2)

온도계수 γ 는 현장에서 작동 중 온도에 의해 일어나는 에너지수율 손실의 결정적인 인자이다. 높은 수율을 위해서는 그 값이 가능한 한 낮아야 한다. 온도계수는 제조 프로세스나 태양광모듈 설계보다는 태양전지기술에 더 많이 의존한다. 최선의 값은 박막 태양광모듈(a-Si, CdTe)에 의해 얻어지는데, -0.23 %/K ~ -0.39 %/K 사이이다. 결정질실리콘 기술의 γ 는 -0.43 %/K 수준이고, 고효율 결정질실리콘 기술의 경우는 -0.35 %/K 이다.





그림 9: 온도계수 α , β , γ 를 결정하기 위해 선형 피팅한, 결정질실리콘 모듈에서 I_{sc}, U_{oc}, P_{Max} 의 온도 의존성 (Source: [40]).

2.1.3 조사강도-온도 (G-T) 성능 매트릭스

IEC 61853-1 [3]에서는, 출력 매트릭스라고도 알려진 소위 조사강도-온도(G-T) 성능 매트릭스를 결정하기 위해 서로 다른 조사강도와 온도의 조합에 대해 명시하고 있다. 출력 매트릭스는 표 2에 나타낸 것과 같이 조사강도 100~1100 W/m², 온도 15~75℃ 범위의 다양한 수준에서 21개의 모듈 출력 측정의 한 세트이다. 규격에는 G-T 매트릭스를 구성하는데 다양한 방법들이 허용되어 있고 그 개념은 현장에서의 작동 중 일어날 수 있는 모든 가능한 옵션들을 커버하는 것이다.



조사강도 (W/m²)	모듈 온도 (°C)			
	15	25	50	75
1100	NA	\checkmark	\checkmark	\checkmark
1000	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
800	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
600	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
400	\checkmark	\checkmark	\checkmark	NA
200	1	\checkmark	NA	NA
100	\checkmark	\checkmark	NA	NA

표 2: 출력 매트릭스를 얻기 위해 적용한 조사강도와 모듈 온도 수준들 (IEC 61853 Part 1에 정의되어 있음)

(NA: not applicable)

매트릭스에서 빈의 총량은 P_{mpp} 측정을 위한 노력과 정확도 사이의 절충으로 잡는데, 4 세트의 T_{mod} 과 7 세트의 G_{POA} 를 취하기로 결정되었다. 상식에 기준하여 적용하기로 했는데, 현장에서 일어날 가능성이 적은 6 개 극단적 위치의 빈들은 매트릭스로부터 배제되었다. 그래서 7 x 4 = 28 minus 6 = 22 빈들이 제조업체가 측정해서 채워야 하는 조건들이다.

2.2 옥내 시험 방법 IEC 61853-2

2.2.1 분광응답

분광응답(spectral response: SR)은 광원의 파장에 따른 효율을 나타낸다. 이는 주로 태양전지 기술과 그 밴드갭에 의해 결정되는데, 태양전지의 품질, 반사방지 코팅, 임베딩 소재와 전면 유리에 의해서도 크게 영향을 받는다.

에너지등급 규격 Part 2에서와 같이[4] 태양광모듈의 분광응답을 측정하기 위해서는 조정이 가능한 좁은 대역폭(narrow-bandwidths) 광원을 가진 측정 장치가 필요하다. 이는 투과 필터나 혹은 격자 단색화장치(grating monochromator)를 갖춘 솔라 시뮬레이터로 가능하다(그림 10 참조).





그림 10: 대형 태양광모듈의 분광응답 측정용 시스템 (Source: TÜV Rheinland Group).

결정질실리콘 태양전지는 275~1190 nm 의 태양광 파장 범위에서 활성화된다 (그림 11). 동일한 기술에서도 분광응답 곡선들의 변화가 다양하기 때문에 모든 태양전지 기술들의 분광응답 거동을 일반화하기 어렵다. 그래서 각 태양광모듈 유형별로 시험소에서 측정이 이루어져야 하고, 정확한 출력 등급을 위해서는 분광 변화(shift)가 반드시 고려되어야한다.

AM1.5와 비교하여 태양광모듈 성능에서 분광 변화의 영향을 정량화하기 위해[41], IEC 60904-7[42]에 의거하여 분광 불일치(spectral mismatch: SMM) 보정(correction)인자를 계산할 수 있다(그림 11 참조). SMM 은 아래 식과 같이 솔라 시뮬레이터의 분광 조사강도 E(\Lambda), AM1.5 기준 스펙트럼 및 기준 센서와 시험 소자의 분광응답으로부터 계산할 수 있다.

$$SMM = \frac{\int E_{Am\,1.5}(\lambda) \cdot SR_{ref}(\lambda)\delta\lambda}{\int E_{Simulator}(\lambda) \cdot SR_{ref}(\lambda)\delta\lambda} \times \frac{\int E_{Simulator}(\lambda) \cdot SR_{sample}(\lambda)\delta\lambda}{\int E_{AM\,1.5}(\lambda) \cdot SR_{sample}(\lambda)\delta\lambda}$$
(3)

SMM > 1 이면 완벽한 AM1.5 조건에 비해 태양전지가 유효 조사강도를 더 많이 받는다는 것이고, 반면에 SMM < 1 이면 예상보다 더 적게 받는다는 의미이다. 계산된 SMM 를 사용하여 측정한 I-V 곡선의 해당 조사강도를 교정할 수 있다.





그림 11: AM1.5G 표준 스펙트럼과 솔라 시뮬레이터의 스펙트럼과 함께 나타낸 결정질실리콘 기준 태양전지와 CIGS 시료의 분광응답, 결과 SMM: 0.98 [40].

2.2.2 각도 응답

각도 응답(angular response)은 태양광모듈의 효율이 광원의 입사각에 의존하는 것을 나타낸 것이다. 각도응답 곡선은 주로 태양광모듈의 전면 유리에 따라 달라진다. 깊게 파인 구조의 유리나 혹은 반사방지 코팅 유리는 그렇지 않은 유리에 비해 각도 거동이 더 좋을 뿐 아니라 투과도도 더 좋다. 그럼에도 불구하고, 전면유리 최적화로 인한 수율의 이득을 정량화할 때는 오염 거동에 미치는 영향도 반드시 고려되어야한다.

에너지등급 규격 Part 2[4]에서 요구하고 있는 바와 같이 이 측정의 목표는 입사각이 높을(>40°) 때의 반사손실을 결정하는 것이다. 시료를 기울이는 동안 기하학적 위치 때문에 발생할 수 있는 영향을 배제하기 위해(그림 12 참조) 측정 시그널은 코사인 값으로 정규화시켜야 한다. 입사각 0 에 의존하는 단락전류 측정값 I_{SC} 은 아래 식과 같이 정규화시킨다.

$$\tau_{rel}(\theta) = \frac{I_{SC,STC}(\theta)}{\cos(\theta) \cdot I_{SC,STC}(\theta)}$$
(4)

솔라 시뮬레이터로 대형 태양광모듈의 각도응답을 결정할 때 가장 큰 문제는 시료를 -90° 에서 +90° 사이로 기울일 때 발생할 수 있는 광원의 불균질성이다. 해결책으로 하나의 비파괴적인 접근방식이 제시되어 있다[43].





그림 12: 각도응답 측정 절차, a) 단락전류 측정, b) 측정값을 법선 입사로 정규화, c) 코사인 함수에 기준[40].



2.2.3 공칭 모듈 작동온도

모듈의 온도(T_{mod})는 대부분 주위온도(T_{amb}), 풍속(V_{Wind}) 및 모듈의 활성 표면에 입사되는 태양광 조사강도(G)의 함수이고, 태양광모듈의 에너지수율 생산에 직접 영향을 미친다.

온도 차이(T_{mod} - T_{amb})는 대체로 주위온도와는 무관하고 400 W/m² 이상의 조사강도 수준에서는 조사강도에 선형으로 비례한다.

모듈온도는 아래 식으로 모델링한다.

$$T_{mod} - T_{amb} = \frac{G}{u_0 + u_1}$$
(5)

여기서 계수 u₀는 조사강도의 영향을, u₁은 풍속의 영향을 나타낸다. 이 두 인자들은 설치 장소에 특정되는 것으로 위치에 따라 평가될 것이다.

공칭 모듈 작동온도(Nominal Module Operating Temperature: NMOT)는 조사강도 800 W/m², 주위온도 20℃에서의 공칭 모듈 작동온도를 의미하는데, 다음과 같이 계산한다.

$$NOMT = (T_{mod} - T_{amb})_{@ 800\frac{W}{m} and 2.1 m/s} + 20^{\circ}C$$
(6)

(T_{mod} - T_{amb}) @ G=800 W/m², V_{Wind}=2.1 m/s 는 선형 회귀로 나타난다.

측정에 필요한 설치 배치 방식은 IEC 61853-2 규격에 기술되어 있다. 시험하고자 하는 모듈은 37.5°±2.5°의 각도로 적어도 지상 위 0.6 m 높이에 설치 장착하고, 어레이에서의 모듈의 열적 상태를 반영하기 위해 다른 모듈과 함께 설치한다.

천공온도, 지면온도 등으로 인한 온도 변화를 보상하기 위해 최고 5℃ 까지의 교정이 가능하다. 이를 위해, 2 개의 기준모듈을 시험 시료 좌우에 하나씩 배치한다. 기준 모듈은 NMOT 를 도출하기 위해 6 개월 이상 측정이 된 것이다. 2 개의 기준 모듈과 시험 중의 소자는 동일한 기간 동안 측정을 하고 그리고 2 개 기준 모듈의 6 개월 측정 NMOT 값으로부터 확보한 평균 편차를 시험 중 소자의 NMOT 측정에 적용한다.



2.3 옥외 태양광모듈 특성분석

이미 언급한 바와 같이, 태양광모듈의 전류, 전압 및 출력 같은 전기적 성능 등급은 통상적으로 옥내에서 솔라 시뮬레이터의 조건을 제어하면서 STC 에서 결정이 된다. 이렇게 결정된 등급이 오랫동안 사용이 되어왔었고 그리고 제품의 명판 목적에 맞는다. 보다 실제적인 작동조건을 커버하기 위해, IEC 61853-1 성능 매트릭스는 이런 포인트 측정을 확장하여 조사강도/온도 공간(2.1.3 절 참조)에서 21개의 측정 포인트를 추가토록 한 것이다. G-T 성능 매트릭스는 일체형 온도 제어기능을 갖춘 솔라 시뮬레이터를 통해 얻을 수 있지만, 대형 태양광모듈 수준에서의 분광응답과 입사각 측정은 매우 도전적이며 흔하지 않다. 그래서 옥내 측정방법(61853-1 Chapter 8.2) 외에 자연 태양광을 사용한 2 가지 옥외 측정절차가 마련되어 있다.

- 61853-1 Chapter 8.3, 트랙커와 자연 태양광
- 61853-1 Chapter 8.4, 트랙커 없이 자연 태양광

옥외 특성분석은 또한 조사강도와 풍속 모델을 보정하는데 필수적으로 수반되는 실제 열적인 작동조건에도 영향을 미칠 수 있는데, 이는 NMOT 를 계산하는데 다시 사용할 수 있다.

그리고 특성분석 이전에 현장에서 광조사(light soaking) 혹은 전처리(preconditioning)도 할 수 있다. 준안정성을 나타내는 제품(예, 박막 기술)의 경우, 시험 동안에 빛이 없는 상태에서 상당한 이완이 이루어지는 것을 피할 수 있어 보다 대표성이 있는 측정 결과의 도출이 가능하다. 끝으로 건물일체형 모듈과 같이 비표준화 인자들을 가진 제품의 경우에는 옥외 측정이 유일한 해결책일 수도 있다.

옥외 특성분석도 한계가 없는 것은 아니다. 시험에 요구되는 적절한 기상조건에 의해 제약을 받을 수 있어 시험이 계절에 의존적이 된다. 장비의 확보 가능성은 또 다른 인자이다. 선택한 방법에 따라 트랙커가 필요할 수도 있다. 옥외 조사강도 측정과 적절한 기상측정 도구(풍속, 기압계, 주위온도 등)가 필요하다. 이들 장비들은 옥외 태양광시스템 연구를 하는 시험소에서는 흔한 것들이지만 도시 혹은 공간의 제약을 받는 환경에 있는 시험소에는 실용적이지 않다.

측정은 IEC 61853-1에 기술된 잘 정리된 불연속 포인트들보다는 작동조건이 지속되는 상태를 포함하게 된다. 지속 시간이 길어지는 시험은 "너무 많은 데이터"로 어려워질 수 있다. 그렇기 때문에, 옥외시험을 통상적으로 시험 중인 태양광기술에 맞는 적절한 성능 모델링과, 혹은 IEC 61853-1 매트릭스를 재현할 수 있도록 적어도 전환 방정식과 쌍을 짓는 것이다.

여기 2.1.3 절에서는 옥외에 설치한 2-축 솔라트랙커를 사용하여 태양광모듈의 특성분석을 하는 방법을 소개한다.

2.3.2 절에서는 작동조건을 지속적으로 유지하는데 있어서의 어려움에 대해, 만 일년 기간의 옥외 데이터로부터 그리고 규격에 한정된 것과 같이 최적의 기상조건이 아닌 기간 동안의 모든 측정 포인트들까지 포함시켜 IEC 61853-1 매트릭스를 추출하는 것을 기반으로 한 방법으로 접근하고자 한다.



2.3.1 옥외 태양광모듈 측정: 2-축 솔라트랙커

A. 서론

2-축 솔라트랙커를 사용한 옥외 특성분석은 옥내 광원의 불균질성/발산으로 인한 대형 사이즈 모듈의 입사각 혹은 입사각 수정기(incident angle modifier: IAM) 한계를 우회하는 대체 방법이다. 적절한 기상 하에서는, 61853-1 매트릭스 폭 또는 그 이상의 작동조건도 가능하다. AM0.85에서 AM7.0 이상까지 범위의 분광조건이 가능하다. 입사각도 응답은 자연 태양광의 균질성과 콜리메이션(collimation)의 장점을 살려 결정론적으로 측정할 수 있다.

여기에서는 2-축 솔라트랙커와 함께 옥외 모듈 특성분석용 장비와 절차에 대해 기술하고자 한다. 절차는 법선 입사 혹은 태양광 조사시("on-sun") 특성분석을 포함하는데, 이는 "차광시(off-sun)" 혹은 입사각 시험과 함께 옥외시험으로부터의 데이터 대부분을 차지한다. 하나의 옵션으로 on-sun 열적 시험도 역시 소개한다. On-sun 열적 시험이 누락된 경우에는, 온도계수가 전기적 성능데이터로부터 추출되어야 한다. 상세한 측정 절차와 데이터 축소는 여기서 소개하기에는 너무 길어 문헌으로 대신한다[44].

B. 장비

특성분석은 2-축 솔라트랙커를 사용하여 옥외에서 수행한다. 모듈의 후면에는 저항 온도 소자(resistance temperature devices: RTD) 혹은 열전대(T/C)가 부착되어 있고, 이를 트랙커에 장착한. 측정의 대부분은 모듈이 태양에 수직이 되게 유지하며 이행한다. 전류-전압(current-voltage: I-V) 특성분석은 최소한도로 I_{sc}, V_{oc}, I_{MPP} 및 V_{MPP} 를 추출할 수 있게 충분한 정확도를 유지하며 측정한다. 이들 파라미터들은 샌디아 어레이 성능모델(SAPM)[45]과 같은 "포인트 모델"을 피팅하는데 사용될 수 있다. Single-diode model[46]과 같은 기계론적인 성능 모델의 보정에는 완전한 형태의 I-V 곡선이 필요할 수 있다.



그림 13: 태양광모듈 특성분석용 2-축 솔라트랙커. 매우 다양한 형태의 인자들과 태양전지기술들을 동시에 특성 분석할 수 있다.



이들 시험을 위해서는 다음의 장비가 필요하다.

- 1. 솔라트랙커
 - 모듈과 기준 조사강도 센서를 장착할 수 있는 평평한 시험면
 - 측정 동안에 모듈을 태양의 법선면에 유지시킬 수 있는 트랙킹 시스템
 - 입사각 특성분석 동안에 모듈의 어레이면(plane of array: POA)과 태양 사이의 입사각이 0°~90° 범위가 될 수 있게 트랙커를 통제 제어할 수 있는 offtracking 역량
- 2. 시험면 위에 장착된 조사강도 센서
 - 어레이면에서의 전체 조사강도 측정용의 광대역 기기(통상적으로 일사량계), 기기는 입사각도 응답에 대한 교정이 완료된 것이 바람직,
 - 어레이면에서의 확산 조사강도(diffuse GPOA) 측정용의 광대역 기기(통상적으로 차양을 단 일사량계)[47], (상세 내용은 4.4 장 참조)
- 3. 위상 관측소
 - 직달 법선면 조사강도(direct normal irradiance: DNI) 측정용의 직달일사량계(pyrheliometer), 통상적으로 별도의 2-축 트랙커 위에 장착
 - 높이 10 미터에서의 풍속과 풍향
 - 주위 공기온도
 - 기압계 (선택항목으로 압력을 고려하여 조정한 에어매스 절대값 계산에 사용)
- 4. 분당 2 스캔, 더 바람직한 것은 분당 4 스캔 혹은 더 빠르게 연쇄적으로 이루어지는 모듈의 I-V 특성분석 측정과 기록 능력
- 5. 시험 중인 태양광모듈의 평균 온도를 ±1℃ 까지 측정할 수 있는 수단. 평균온도는 통상 3개 혹은 4개 온도 센서의 측정으로부터 결정된다. 센서는 Pt-100 저항 온도소자(RTDs) 혹은 T-형 열전대임.
- 모듈을 빛으로부터 차단할 수 있는 불투명 소재(열적 시험에만 선택적으로 사용).
 모듈의 측정 시작 전에 주위온도까지 냉각시키는데 사용
- 7. 모듈의 후면에 추가할 수 있는 절연처리(열적 시험에만 선택적으로 사용). 절연처리로 모듈을 가로질러 온도 균일성을 향상시키고 시험 동안에 도달할 수 있는 온도범위를 증가시킴

C. On-sun 전기적 성능 측정

On-sun(조사시) 혹은 법선 입사 전기적 성능 측정은 옥외 시험에서의 데이터 대부분을 차지한다. 이들 측정은 넓은 범위의 기상조건에서 하는 것이 최선이다(표 3과 4 참조). 하루 종일 청명(clear sky) 조건이 일어나지 않으면 여러 날 측정한 데이터를 합칠 수도 있다. 결정질실리콘 모듈의 경우, 일반적으로 이러한 관행이 용인된다. 그러나 상당한 준안정성(metastability)을 나타내거나 혹은 밤사이에 이완(relaxation)이 되는 모듈의 특성을 분석할 때는 주의가 필요하다. 청명 조건 동안의 데이터 수집 외에도 7일에 해당하는 모든 기상(하늘) 조건 동안의 데이터가 필요하다(표 4 참조). 오히려, 이들 데이터는 지나가는 부분적으로 흐린 조건뿐 아니라 완전히 구름으로 뒤덥여 조사강도가 안정되는 조건 둘 다를 대표한다.



표 3: 청명 주위 조건.

파라미터	요구값(Required)	선호값(Preferred)
GNI	800~1050 W/m ²	600~1200 W/m ²
DNI/GNI	> 0.85	> 0.90
에어 매스	1.5~5.0	1.0~7.0
풍속	0~4 m/s	0~10 m/s
최저 시험 기간	600분/2일	1200분/3일

표 4: 흐린 혹은 All-Sky 주위 조건.

파라미터	요구값	선호값	
GNI	200~400 W/m ²	100~500 W/m ²	
DNI/GNI*	0~0.85	(< 0.05)	
최저 시험 기간	200분/1일	1200분/3일	

* 선호되는 조건의 범위, 그러나 측정의 대부분은 DNI/GNI < 0.05 에서 이루어져야한다. 전기적 성능 시험 동안에 모듈은 태양 법선면에 유지시켜야 하는데, 그 동안에 I-V 곡선이 기록된다. 데이터 수집 빈도는 조건의 범위에 따라 적절한 데이터가 얻어질 수 있도록 통상적으로 매 2분마다 이루어지도록 선택한다. 매 I-V 주사(sweep) 전후에 조사강도를 측정하여 I-V 주사 시간 동안의 안정여부를 확인한다. I-V 주사 동안에 조사강도가 변했다고 결정이 되면 그 데이터는 버려야한다. 이런 체크는 데이터 수집 시스템 내에 일체화시키거나 혹은 측정 프로세스 후에 할 수 있다. 가장 대표성이 있는 작동 조건을 만들기 위해 모듈은 I-V 곡선 측정 사이에 최대출력에 유지되도록 하는 것이 더 좋다.

D. 입사각 시험

반사손실은 입사각 시험을 통해 그 특성분석이 이루어진다. 입사각 시험은 흔히 반사방지 코팅이나 혹은 텍스쳐 처리되지 않은 판유리를 그대로 사용하는 모듈의 경우에는 선택적으로 고려될 수 있는데, 왜냐하면 이 경우에는 다목적의 정확한 모델을 구할 수 있기 때문이다[48, 49]. 이 장에서 기술한 전기적, 열적 및 입사각 시험들 중에서, 입사각 시험이 가장 난제인데, 이는 트랙커 움직임(articulation)과 관련한 요구조건 때문이다. 상업용 2-축 트랙커는 보통 선호하는 시험 시간대인 태양 정오(solar noon) 가까운 조건 동안에 모듈을 완전히 태양을 등진(off-sun)(즉 90°) 위치로 전환할 수 있는 제어기능이 결여되어 있고 움직일 수 있는 범위도 제약이 있다. 그러나 적절한 계획과 절차 개발로 이런 한계 범위에서 작업이 가능할 수 있다[47].

시험 동안, 특히 선호하는 태양 정오 가까이에는 안정된 청명 주위조건이 필요하다(표 5 참조). 시험 시작할 때 열적 안정성을 확보하기 위해 모듈은 입사각 시험 시작 전 최소 30분 동안은 태양에 노출되어 있어야한다. 모듈은 초기 10분 동안 태양의 법선면에 있도록 추적해야 하는데, 이 때 I-V 곡선과 모듈 온도가 기록된다(분당 약 4 스캔). 트랙커는 이후 점차적으로 입사각이 0°~90°가 되도록 조정한다. 이상적으로는 트랙커가 사전 계획된 입사각(즉 0°, 5°, 10° 등)을 구현할 수 있도록 확실한 제어시스템을 가질 수 있다. 하지만 보통은 그렇지 못하고 입사각은 기록된 태양과 트랙커 위치로부터 계산해야 된다. 지표면 반사에 의한 조사강도의 변화를 최소화하기 위해, 트랙커 회전은 수평면을 가로지르기보다는 가급적 천정(zenith)을 향하도록 이루어진다[47].



표 5: 입사각과 열적 시험을 위한 주위 조건.

파라미터	요구값	선호값
글로벌 법선면 조사강도(Global Normal Irradiance: GNI)	800~1200 W/m ²	950~1050 W/m ²
GNI에서의 변동	± 2.5%	± 0.5%
직달 법선면 조사강도(DNI)/GNI	> 0.85	> 0.90
에어 매스(절대값, 압력 조정)	1~2	1.4~1.6
풍속	< 4 m/s	< 2 m/s
주위 온도	> 0°C	> 10°C

E. 태양광모듈 온도계수를 결정하기 위한 on-sun 열적 시험

열적 특성분석은 I_{sc}, I_{MPP}, V_{oc} 및 V_{MPP} 의 온도계수를 결정하기 위해 수행한다. 이 절차에서는 시험 대상 모듈의 전기적 성능 특성분석에 대한 사전 지식이 필요하지 않다. 시험 동안에는 안정된 주위온도가 요구된다(표 5 참조).

모듈은 불투명한 시트로 덮여있어 주위 온도까지 냉각이 된다. 일단 주위온도(약 6℃ 내에까지)에 도달하면, 모듈의 후면은 열적으로 단열시켜 온도 균일성을 향상시키고, 시험 동안에 도달할 수 있는 최대 온도를 증가시킨다. 그런 다음 트랙커를 태양에 수직으로 유지하고 신속히 I-V 곡선과 모듈온도를 측정한다(분당 약 4 스캔). 커버를 제거하고 평형 온도까지 상승시킨다. 통상적인 시험은 일단 커버가 제거된 후에는 약 30분이 소요된다. 그 다음 선형회귀 분석을 통해 전압과 전류 온도계수를 결정한다. 출력의 온도계수는 직접 결정하거나 혹은 IMP와 VMPP 온도계수로부터 계산한다.

2.3.2 트랙커 없이 옥외 태양광모듈 특성분석: 옥외 측정데이터로부터 IEC 61853-1 매트릭스 추출

다양한 태양광기술의 성능을 이해하기 위해 이전에는 G-T 혹은 출력 매트릭스를 사용하여 왔다[48-50].

여기서는 옥외 측정으로부터 IEC 61853-1 매트릭스를 추출하는 방법과 관련하여 Valckenborg[51]의 조사결과를 요약하고자 한다. 여기서는 트랙커 없이 다음과 같은 장치들이 사용되었다.

- BIPV 파사드 모듈
- 파사드에 설치된 c-Si와 CIGS 모듈
- 자체 개발한 IBC 와 n-PERT 모듈을 남향에 30° 기울기로 고정 랙에 장착

트랙커 없는 옥외측정([2]의 8.4 장)을 출발점으로 사용하였다. 그러나 연구 목적으로 모든 측정 포인트들을 포함시켰고, 규격의 제한사항을 무시하였는데, 규격에 따르면 구름과 바람에 의한 방해를 최소화하면서 햇볕이 완전히 드는 동안만 사용하도록 권장하고 있다. 그리고 측정 기간으로 거의 만 일년을 고려하여야 한다. 이는 규격에 권장된 최소 3일의 기간보다는 훨씬 더 긴 것이다.



A. 시각화

G_{POA}-T_{mod} 매트릭스의 함수로 특정 관심이 있는 파라미터들(V_{OC}, V_{mpp}, I_{sc}, I_{mpp}, FF, PR 혹은 입사각 또는 분광 특성)을 2D-컬러 플롯으로 시각화하는 것이 아주 효과적인 도구로 입증되었다. 각 빈(bin) 내에 있는 모든 포인트들에 대한 추가적인 통계는 측정장비의 정전, 예상치 않았던 조사강도 불일치 혹은 24/7 옥외 연구에서는 일상적인 기타 이슈들에 의해 방해를 받았던 측정 포인트들을 더 용이하게 필터링시켜 준다.

B. 결과

아래의 결과들은 네덜란드 Eindhoven 소재 SolarBEAT 시험 설비에 수직으로 장착된 BIPV 모듈로부터 기록된 값들이다[50]. BIPV 모듈은 IEA PVPS Task 15 (Enabling Framework for the Acceleration of Building Integrated Photovoltaics, BIPV)의 라운드 로빈 활동의 일부분으로 2017년 말부터 2019년말까지 수행되었다. 이 라운드 로빈의 구성과 첫 결과 및 유리/유리-BIPV-모듈에 대해서는 문헌 [51, 52]에 상세히 기술되어 있다. 그림 14는 최대출력 Pmop의 결과이다.



그림 14: BIPV 파사드 모듈의 라운드 로빈 결과 - T_{mod} 와 G_{POA} 함수에 따른 P_{mpp} . 적색바에는 STC 에서의 등급 출력까지 정의되어 있는데, 이 모듈의 경우 219 W_p 이다.

이 P_{mpp}-매트릭스에는 2 가지 정도 예상치 못한 것이 발견되는데, 추가적인 시각화와 또 다른 도구를 사용하여 밝혀진 것이다. 첫 번째, 그림 15에서와 같이 각 빈에 있는 많은 수의 데이터 포인트를 분석하였다. 측정 정확도의 제한 때문에 P_{mpp}-매트릭스 플롯에 빈을 포함시키는 하나의 기준으로 임계 개수의 데이터 포인트를 취하는 것은 좋은 관행이다. 임계치가 너무 낮으면 매트릭스에 잡음이 더 심하게 되고, 너무 높으면 흥미있는 데이터들이 버려질 것이다. 이 BIPV 모듈의 데이터세트에서는 n=5에 절충점을 찾았고 그리고 이 임계치를 모든 그래프에서 사용할 것이다. 그림 15에서와 같이, STC 가 있는 빈은 만 일년 기간에 겨우 14 개의 데이터 포인트만 가진다. 이는 매우 놀라운데, 북서 유럽에 있는 파사드는 G_{POA}=1000 W/m² 인 날이 연중 겨우 몇 시간밖에 되지 않는다는 점에 유의해야한다. 그리고 이처럼 강한 햇빛이 있는 시간(sunshine hours) 동안에 T_{mod}는 특히 후면에서의 단열 때문에 급격하게 증가한다.




그림 15: T_{mod} 와 G_{POA} 의 함수로서 데이터포인트의 개수. 컬러바는 모든 빈 사이의 차이를 더 분명하기 위해 로그 스케일로 되어있다.

다음에는 빈마다 일사량의 수준에 관심을 두고자 하는데, 이는 어떤 빈이 연간 수율에 가장 큰 기여를 하는지, 즉 엄청나게 많은 데이터포인트를 가진 왼쪽 모서리에 있는 빈(100 W/m², 15°C)으로부터 얼마나 많은 기여가 예상되는지를 보여주기 때문이다. 이 H_{POA}-매트릭스 플롯이 그림 16이다. 이 그래프의 경우 임계치를 설정할 필요가 없는데, 단지 몇 개의 데이터포인트만 있는 빈은 역시 H_{POA} 가 매우 낮아 배경색에 섞여 없어져 버린다. 가장 기여도가 높은 기상조건(그리고 빈)은 한눈에 뚜렷하다.



그림 16: T_{mod} 와 G_{POA} 함수로서의 조사량(Irradiation) H_{POA}[kWh/m²]. 녹색 컬러바는 기간 동안의 총 조사량에 대한 직관적인 기여도를 보여주기 위해 선형 스케일로 표시되어 있다.





태양광은 G_{POA} 값에 매우 선형적이라 모듈의 특정 수율도 유사할 것으로 예상한다. 그림 17은 그림 16과 동일한 컬러바를 사용하여 특정 수율을 플롯한 것이다.

G_{POA}=600 W/m² 열에 있는 P_{mpp}-매트릭스 빈들은 국부적으로 최대 122 W_p를 나타내는데, 이는 T_{mod} 가 증가함에 따라 통상적으로 P_{mp} 는 감소하기 때문에 이해하기 어렵다. 이런 이유로, 그림 18에서와 같이 각 빈별로 통계를 추가하였다.



그림 18: (좌): 각 빈에 추가된 통계. (우): 추가적인 통계 파라미터들에 대한 설명.

이 통계를 이용하여 예상에서 벗어난 데이터들을 제거할 수 있다(스파이크와 데이터 갭에 의해 야기). 여기 그래프는 열외 데이터를 필터링 한 후의 버전이다. 여전히 의아스러운 데이터포인트들은 대부분 제거하기 어려운 국부적인 음영에 의해 야기된다. 최소값은 하나의 데이터 포인트이고, 최대값의 경우에도 역시 하나의 데이터 포인트에

그림 17: T_{mod} 와 G_{POA} 함수로서의 특정 수율 Y [kWh/kW_p]. 녹색 컬러바는 기간 동안의 직관적인 기여도를 보여주기 위해 선형 스케일로 표시되어 있다



불과하다는 점을 주목하여야 한다. 그러나 그림 18의 표준편차(stdev)는 빈의 경계를 바탕으로 예상된 스프레드에 맞게 타당할 것이다.

그 후에, 보다 매끄러운 그래프를 생성하기 위해 양방향으로 빈의 개수들을 증가시켰다(그림 19 참조). 결과는 여전히, 낮은 온도(T_{mod} < 15°C)에서의 P_{mpp} 값이 너무 낮게 보이는 거동을 완전히 만족시키지는 못했다.

이 정성적인 관찰결과를 정량화하는데 있어 PR 매트릭스가 이 가설을 확인할 수 있는 가장 좋은 그래프이다(그림 20 참조).



그림 19: T_{mod} 와 G_{POA} 함수로서의 P_{mpp} . 빈 크기 부여는 규격에 따르지 않고 100 W/m^2 와 5°C 에서 동일거리로 설정.





그림 20: T_{mod} 와 G_{POA} 함수로서의 PR(빈을 크기를 더 작게). 추가적인 임계치 적용, 본문 참조

그림 20을 구성할 때 추가적인 임계치(n > 5 기준의 위 부분)를 적용하였는데, 만 일년 기간의 특정 수율에 0.5 % 이상 기여하는 빈들만 포함되었다. 그림 20에서, PR 이 T_{mod} 증가와 함께 항상 감소하는 경향을 훨씬 더 잘 이해할 수 있다. 그림 20에서 관찰할 수 있는 다른 점 하나 역시 무시할 수 없는데, 100 W/m² 를 가진 가장 낮은 모든 빈들의 PR 이 예상보다 훨씬 더 낮은 것이다. 여기서 우리는 이들 조사량 수준은 대부분 태양광의 각도가 낮을 동안에 파사드에 도달한다는 가설을 제의한다. 그러므로 각 측정 포인트별로 입사각을 계산하고, 그 결과를 동일한 매트릭스 그래프에 가시화하였다(그림 21 참조).





그림 21: T_{mod} 와 G_{POA} 함수로서의 입사각(AOI) (빈을 크기를 더 작게).

AOI > 90°인 경우 태양은 모듈의 뒤에 위치하므로, 이런 순간의 모든 조사강도는 확산광 형태가 됨을 주목하여야 한다. 모듈출력에 대한 입사각의 영향을 입사각 수정기(incidence angle modifier: IAM)라 부르는데, 이는 1에서 0까지 단조롭게 감소하는 AOI 의 함수이다. 이 IAM-함수를 측정할 수는 없다(정확한 방법은 61853-2에 명시). 그러나 만약 AOI 영향이 100 W/m²-빈들의 출력이 더 낮은 것을 설명할 수 있을 정도로 충분히 크다면, IAM 에 대한 일반적 가정을 통해 정량적인 추정을 하고자 하는 목적에는 적합할 수 있다. b₀=0.0을 가진 ASHRAE-함수[53]를 각 측정 포인트에 적용시켰다. 그 후에 각 빈의 IAM 에 대한 통계를 플롯하였다.

그림 22는 태양의 위치가 얕은(AOI 값이 높음) 시간에 모듈 출력이 얼마나 크게 감소시키는지 분명히 보여준다.





그림 22: T_{mod} 와 G_{POA} 함수로서의 IAM(ASHRAE-함수로부터 계산) (빈을 크기를 더 작게).

통계를 포함한 새로운 시각화를 3 가지 사용 사례에 적용시켰다[50]. 그리고 2020년 3월 시작한 IEA PVPS Task 15의 2단계에서, 전세계 7개 지역에서의 만 일년 기간의 BIPV 모듈 측정 데이터를 분석하는데 이들 도구들이 사용될 것이다.

2.4 IEC 61853-1 매트릭스 데이터세트

미국 Sandia National Laboratories(SNL)은 9개의 태양광모듈을 New Mexico 의 CFV 시험소에 보내어 IEC 61853-1에 따른 시험을 의뢰하였다. 이 시험의 결과는 PV Performance Modelling Collaborative 웹사이트[54]에 공개가 되었다. 사용된 모듈의 사양은 표 6과 같다.

제조업체	모델	태양전지 기술	
Jinko Solar	JKM260P-60	다결정실리콘	
LG	LG320N1K-A5	N-형 단결정실리콘	
Panasonic	VBHN325SA 16	HIT 단결정실리콘	
Canadian Solar	CS6K-270P	다결정실리콘	
Canadian Solar	CS6K-275M	단결정실리콘	

표 6: IEC 61853-1에 따라 시험한 SNL 모듈.



Hanwha Q-Cells	Q.PLUS BFR-G4.1 280	다결정실리콘 PERC
Hanwha Q-Cells	Q.PEAK-G4.1 300	단결정실리콘 PERC
Mission Solar	MSE300SQ5T	단결정실리콘 PERC
Itek Energy	IT-360-SE72	단결정실리콘 PERC

모든 매트릭스 시험은 ISO 17025 인정을 받은 CFV Labs (이전의 CFV Solar)에서 IEC 61853-1:2011 § 8.1에 따라 이루어졌다. 모듈 측정은 Sandia 와의 계약으로 2019년 후반에 시행되었다.

9개 태양광모듈 모두는 개방회로 조건, 일사량 최소 40 kWh/m² 에서 옥외 노출을 통해 전처리가 되었고 매트릭스 시험 이전에 EL 이미지를 촬영하였다. STC 에서의 모듈 성능은 IEC 61215-2:2016 MQT 06.1에 따라 측정되었다.

매트릭스 플래시 측정에는 IEC 60904-1:2015의 요구조건을 만족하는 co-planer Fraunhofer WPVS 형 기준 태양전지로 제어되는 조사강도를 가진 AAA Halm 펄스형 솔라 시뮬레이터를 사용하였다. 모듈에 적용할 수 있는 외부양자효율(EQE) 값이 없어서 분광불일치 인자 1.0을 사용하였다. EQE 는 외부로부터 태양전지에 조사되는 주어진 에너지의 광자의 개수 대비 태양전지에 의해 수집된 전하 캐리어 개수의 비를 나타낸다. 일체형 열 챔버는 층류(Iaminar) 공기 흐름으로 모듈 온도를 변화시키는데, 모듈온도는 불확도 ±0.13℃ 를 가진 교정된 RTD 를 사용하여 4개 지점에서 모니터한다. 각 측정에서 최대-최소 온도 스프레드는 1.5℃ 미만이다.

시험 포인트들은 100~1100 W/m² 범위의 조사강도와 15~75°의 온도를 포함한다. IEC 61853-1:2011 § 8.1에 정의된 시험 포인트 외에, 낮은 조사강도/높은 온도 조합(200/50, 100/50, 400/75, 200/75, 100/75)에 해당하는 5개 포인트들을 추가 측정하였다. 조사강도는 Xenon arc 램프에 인가하는 전압 조정으로 변화시킨다. 분광일치도는 모든 조사강도에서 class A 혹은 그 이상으로 유지된다. 보고된 포인트들은 각 조사강도/온도 조건에서 3 개 I-V 곡선의 평균을 취한다.

모니터 셀은 열 챔버 바깥 위치에 장착하지만 시험 모듈과 동일 면(co-planar)에 있지 않다. 모니터 셀의 민감도는 STC 에서 측정한 Pmpp 값이 재현성이 있도록 조정하였다.

각 모듈마다 데이터 포인트와 PVsyst 6 PAN 파일을 다운로드할 수 있다[54]. PAN 파일은 CFV Labs's PANOpt® 자체 소프트웨어로 마련한 것으로, 매트릭스 측정에 최적화된 PVsyst 6 single diode model 파라미터들을 계산한다. I_{sc}, V_{oc}, I_{mpp}, V_{mpp}, I_{sc} 값의 측정과 Swanson 방법으로 I-V 곡선으로부터 계산한 R_s 값으로부터 시작하여, 성능 매트릭스(Performance Matrix) 포인트에 대해 PVsyst 6 model 이 예측한 P_{mpp} 값이 최소한의 오류로 측정값(3 개 시료의 평균)과 일치할 때까지 PANOpt® solver 는 R_s, R_{sh}, RshG0의 주어진 파라미터 공간 범위에서 처리 절차를 반복한다. PAN 파일 모델 정확도는 각 모듈별로 그 데이터 보고서에 기록되어 있다.



2.5 양면형 태양광모듈의 특성분석

2.5.1 생산 출력 특성분석

양면형 태양광모듈에서는 후면 조사강도에 의해 구동된 추가적인 출력 이득 때문에, I_{sc}, V_{oc} 및 P_{max} 와 같은 전통적인 단면형(monofacial) 모듈의 특성 파라미터들 외에도 양면형 계수(bifaciality coefficient)와 BiFi(단위 후면 조사강도 당 출력 이득을 나타내는 양)와 같은 보다 고유한 특성 파라미터들이 고려되어야 한다. 이들 파라미터들을 결정하는 절차는 IEC TS 60904-1-2에 기술되어 있다[55].

기술적인 명세에는 솔라 시뮬레이터와 자연 태양광 하에서의 시험방법 절차가 포함되어 있다. 솔라 시뮬레이터를 사용하는 절차에 대해서는 2가지 옵션이 기술되어 있는데, 단일면(single-side) 조사(illumination)와 양면(double side) 조사로 그 개념은 그림 23과 같다.



그림 23: 양면형 태양광모듈의 출력 산출량 특성분석: 솔라 시뮬레이터를 사용한 방법.

양면형 모듈의 차이와 파라미터들은 표 7에 기술되어 있다.

2018년 이후 양면형 모듈이 점차로 개발되어 중국에서는 널리 사용되고 있다. 중국 시장에서 양면형 모듈의 성능평가 방법을 규제하기 위해 수십의 태양광 회사와 3자 시험소들이 공동으로 중국 태양광 산업 규격 1619-2018 (Measurement procedures for current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) modules)[56]을 제정하였다. 국제전기기술위원회(IEC)는 2019년 IEC TS 60904-1-2를 발간하였다. 표 8은 중국 규격과 IEC 규격의 유사점과 차이점을 비교한 것으로, 단일면 조사, 양면 조사 및 옥외 조건의 3 가지 다른 시험환경을 고려하여 기술하였다.



표 7: IEC TS 60904-1-2 에 정의된 양면형 모듈의 파라미터들

파라미터	설명
양면형 모듈의 전면과 후면 I-V 특성분석 I _{scf} , V _{ocf} , P _{maxf} I _{scr} , V _{ocr} , P _{maxr}	양면형 소자의 I-V 특성 측정 절차는 IEC 60904- 1의 것과 동일한 기본 원칙을 토대로 한 것이나, 약간의 추가적인 고려사항이 필요하고 그리고 양면형 소자에 고유한 추가적인 특성분석도 제공한다.
양면형 계수 φ _{lsc} , φ _{Voc} , φ _{Pmax}	양면형 소자의 후면과 전면의 주요 특성 사이의 비를 나타내는 특성은 아래 식으로 결정되는 고유한 양면형 계수에 의해 정량화 된다: $\varphi_{\rm Isc} = \frac{I_{scr}}{I_{scf}}$ $\varphi_{\rm Voc} = \frac{V_{ocr}}{V_{ocf}}$ $\varphi_{\rm Pmax} = \frac{P_{maxr}}{P_{maxf}}$
양면형 인자 φ	φ 는 I _{sc} 와 P _{max} 의 양면형계수 φ _{Isc} 와 φ _{Pmax} 사이의 최소값이다.
후면 조사강도에 의해 얻게 되는 출력 이득 수율을 고려한 양면형 모듈의 I-V 특성분석 I _{sc} , V _{oc} , P _{max}	 a) 양면 조사의 경우: 전면 조사강도 G_r= 1000 W/m² + 적어도 2 개의 다른 후면 조사강도 수준 G_r; b) 단일면 조사의 경우: 아래 식에 따라 전면에 적어도 2 개의 다른 등가 조사강도 수준 G_E G_{Ei}= 1000 W/m² + φ · G_{ri}; φ = Min(φ_{Pmax}, φ_{Isc})
후면 조사강도에 의해 얻게 되는 출력 이득 수율 BiFi	P _{max} 대 G _r 데이터 시리즈의 선형 피팅으로부터 유도된 기울기, 이 선형최소자승(linear least squares) 피팅은 P _{maxstc} 에서 <i>P</i> _{max} 축을 가로지르게 되고, 그 비선형은 불확도 추정에서 고려될 것이다.



표 8: 양면형 모듈의 에너지등급용 IEC 와 중국 CQC 규격의 비교.

시험 항목		규	격	
		IEC TS 60904-1-2	China PV Industry Standard 1619-2018	
양면형 계수 $arphi$		$\varphi = \min(\varphi_{ISC'} \ \varphi_{Pmax})$		
후면 조사강도에 의해 얻어진 축력 이드	양면 조사	전면 조사강도 G _f = 1000 W/m ² + 적어도 2 개의 다른 후면 조사강도 수준 G _r	-	
물덕 이득 수율의 결정 _ 단일면 조사		아래 식에 따라 전면에 적어도 2 개의 다른 등가 조사강도 수준 G _ε G _{εi} = 1000 W/m ² + φ·G _{ri}		
		적어도 2 개 수준의 조사강도가 시험되어야한다. <i>i</i> = 1, 2, 3,; 0≤G _{r1} < 100 W/m ² , 100 W/m ² ≤ G _{r2} < 200 W/m ² and 200 W/m ² ≤ G _{r3}	적어도 50 W/m², 100 W/m²,150 W/m², 200 W/m² 의 후면 조사강도가 시험되어야 한다.	
	옥외	후면 조사강도의 불균일성은 하는데, 후면 조사강도 측정 적어도 5 개 포인트가 측정 가장자리와 지면 사이의 거 권장한다.	은 10 % 미만이어야 성용의 기준 소자 외에 되어야 한다. 소자의 아래 리는 0.5~1.0 m 를	

_



시험조건: 조사강도 ≥ 800 W/m², 모듈 온도: 25 ± 1°C). 양면형 모듈의 I-V 특성분석은, 전면 조사강도 1000 W/m² (혹은 조사강도 값에 보정한), 그리고 후면 조사강도 G, 는 적어도 다음 4 가지 수준에서 선택한다: G_{r, 50} G_{r, 100} G_{r, 150} G_{r, 200}. 만약 후면 조사강도가 얻어질 수 없으면 선형 보간법을 사용한다.

BiFi, 후면 조사강도에 의해 얻어진 출력 이득 수율	후면 조사강도에 의해 얻어진 출력 이득 수율 BiFi 는 P _{max} 대 G _r 데이터 시리즈의 선형 피팅으로부터 유도된 기울기이다.	-

2.5.2 IEC 규격을 토대로 한 태양광모듈의 에너지등급

현재 IEC 61853 시리즈 규격은 다양한 온도와 조사강도에서 단면형 태양광모듈의 출력 등급시험 요구조건과 환경 파라미터(분광응답, 입사각 그리고 모듈 작동온도 측정) 및 기준 되는 기후 프로필을 명확히 하고 있다 이들 규격에 의하면, 만 일년 기간 최대 출력 작동 상태에서 기후 특성에 따른 단면형 모듈의 에너지등급은 서로 다른 기후별로 계산될 수 있다. 그러나, 생산 출력 특성분석용 IEC TS 60904-1-2 외에 양면형 모듈의 에너지등급에 관한 규격은 더 이상 명확하게 하지 못하고 있다. 단면형과 양면형 모듈의 에너지등급에 관한 IEC 규격은 아래에 그 목록이 있는데, 에너지등급 계산용 IEC 규격은 주로 단면형 모듈에 관한 것임을 알 수 있다.



표 9: 단면형과 양면형 모듈의 에너지등급용 기존 IEC 규격의 비교.

파라미터/특성	단면형 모듈	양면형 모듈
최대 출력 Pmax	IEC TS 60904-1	IEC TS 60904-1-2
양면성		IEC TS 60904-1-2
다양한 온도와 조사강도에서의 출력 등급	IEC 61853-1	Х
분광응답성	IEC 60904-8	Х
입사각도	IEC 61853-2	Х
모듈 작동온도	IEC 61853-2	Х
에너지등급 계산방법	IEC 61853-3	Х

2.5.3 양면형 태양광모듈 에너지등급의 옥외시험

지금까지 양면형 모듈의 옥외시험은 주로 후면의 조사강도와 후면 조사강도에 의해 구동된 추가적인 출력 이득 수율 연구에 초점을 두었다. 태양 고도각(elevation angle), 장착 랙의 높이 및 알베도(albedo) 같은 인자들은 양면형 모듈의 후면 조사강도에 더 큰 영향을 미친다.

동시에, 후면 조사강도의 불균일성은 등가 조사강도를 계산하고, 그에 따른 양면형 태양광모듈의 에너지등급을 계산할 때 중요한 역할을 한다. 후면 조사강도에 의해 얻어진 출력 이득 수율의 경우, 양면형 모듈의 출력 이득은 모듈 장착 랙의 높이와 함께 증가하지만 모듈의 경사각과는 관련이 적다는 것을 최근 연구가 보여주고 있다[57].

등가 조사강도의 결정에 관한 연구의 경우, 문헌 [58]에서 단면형과 양면형 모듈 사이의 에너지등급의 차이가 비교되었다. 이 연구에서, 성능비(PR)를 계산하기 위해 양면형 모듈의 전면의 조사강도만 사용할 때의 결과는 단면형 모듈의 것과는 상당히 다른데, 조사강도가 높은(700~1100 W/m²) 기간에는 11 % 더 높고, 낮은 조사강도에서는 단면형 모듈의 것보다 20 % 더 높은데, 이런 상황은 조사강도는 낮으면서 온도가 더 높은(40 %) 조건에서 훨씬 더 높아진다(40 %). 등가 조사강도는 아래 식으로 결정한다.

$$G_{\rm E} = G_{\rm f} + \varphi \cdot G_{\rm r} \tag{7}$$

이 경우, 양면형 모듈의 성능비는 단면형 모듈의 것보다 더 일관성이 있다.

문헌 [58]에 의하면, 성능비의 결과는 사용하는 계산방법에 따라 더 크게 변화한다. 양면형 모듈의 에너지등급용 규격은 아직 없는데, 양면형 모듈의 성능비 계산의 핵심은 계산 과정에 포함되는 조사강도의 값을 결정하고, 그리고 성능비를 계산하기 위해 등가 조사강도를 사용할 때 후면 조사강도의 균일성과 옥외조건에서 양면형계수의 적용을 고려하여야 한다는 점이다.



Chinese Academy of Sciences 의 Institute of Electrical Engineering 는 중국 허베이성 바오딩에 옥외시험 플랫폼을 구축하였는데, 이는 양면형 모듈의 에너지등급 실험을 수행하는데 사용된다. 플랫폼의 정보는 다음과 같다.

표 10: 시험 플랫폼 정보.

위치:	N 38 ° 55'38.77 ″ E 115 ° 26'7.18 ″
기후 유형:	따뜻한 기후
지면:	백색 콘크리트
시험 장비:	일사량계, I-V 트레이서
시험 모듈의 공칭 파라미터 (P _{max}):	단면형: 310 W 양면형 구성품: 330 W, 345 W
측정 파라미터:	모듈 전/후면 조사강도 (수집 간격:5초); 모듈의 I-V 특성분석(수집 간격:5분)



양면형 모듈의 성능비를 계산하기 위해, 우선 여기에서는 계산에 필요한 조사강도 파라미터를 결정하는데 다음 3 가지 다른 방법이 사용되었다.

- 1. 전면의 조사강도만 성능비계산에 사용한다.
- 등가 조사강도를 계산하기 위해 IEC TS 60904-1-2에 정의되어 있는 양면형 계수를 채택하고, 성능비를 계산하기 위해 등가 조사강도를 사용한다. GE=Gf++Gr
 성능비계산에 포함된 조사강도는 양쪽 면 모두의 합을 사용한다.

전면과 후면의 조사강도 변화 통계에 의하면, 하루 중의 조사강도 변화 곡선은 아래와 같다.





그림 25: 양면형 모듈의 전면과 후면 위에서의 실시간 조사강도 변화.

다양한 조사강도 계산방법을 사용한 양면형 모듈의 성능비와 단면형 모듈의 성능비를 비교한 것이 그림 26이다. 조사강도 계산방법을 달리하면, 하루 중의 성능비 변화 경향은 비교적 일관성이 있지만, 첫 번째 방법에서는 후면 조사강도가 고려되지 않아 그 성능비 계산결과가 100 %보다 더 높고, 그리고 후면 조사강도를 고려한 계산방법에 비해 후면 조사강도를 고려하지 않은 경우의 계산결과가 약 10 % 더 높다.

오전부터 정오까지, 양면형 모듈의 성능비는 단면형 모듈보다 더 높은데, 오후에는 후면 조사강도를 고려한 양면형 모듈의 성능비가 단면형 모듈보다 약간 더 낮은 결과를 보여준다. 예비 분석결과, 이는 후면의 조사강도 균일성에 의해 야기되는 것으로 나타난다. 오후에는 태양이 비스듬히 비치기 때문에 지면에 가까운 후면의 일부분에 음영이 생길 수 있다. 그래서 음영이 진 낮은 곳보다 높은 곳의 조사강도가 더 높고, 일사량계가 모듈의 높은 위치에 놓일 경우 후면의 조사강도 측정값은 실제값보다 더 높을 수 있어 그 결과 양면형 모듈의 성능비가 더 낮아지게 된다.

양면형 태양광모듈의 성능비 계산방법은 단면형의 것과 같지만, 후면에 의해 발생한 출력 이득 때문에 유효 조사강도를 결정하는 것이 핵심이 된다. 그림 27은 조사강도 선정 방법을 달리했을 때의 성능비(PR)를 비교한 것이다.

한편, 등가 조사강도 계산의 경우에는 후면 조사강도 균일성의 영향이 고려되어야 한다. 그리고 등가 조사강도를 계산하는데 IEC TS 60904-1-2에 정의된 모듈의 양면형 계수를 사용할 때는 옥내시험에서 측정된 양면형 계수가 옥외시험 조건 하에서의 조사강도 계산에 적합한지 고려하여야 한다.







양면형 모듈의 후면 조사강도는 지면으로부터 모듈의 높이, 지면의 소재, 음영 및 기타 인자들에 따라 변한다는 것을 유의해야 하는데, 그래서 양면형 모듈의 성능비는 기후 영역뿐 아니라 주변 환경과 모듈의 설치 배치에도 관련된다. 그러므로 보통의 기후 영역에서 양면형 모듈의 성능비 계산결과에 지지대 높이와 기타 상세 인자들이 미치는 영향을 어떻게 결정하는가가 역시 핵심 고려대상이다.



설치 현장의 기후 데이터 비교

설치 현장의 기후 데이터는 다음과 같이 분석된다.



그림 28: 계절별 일간 조사강도의 비교.

다른 달에 모듈의 전면 조사강도를 비교함으로써 여름에 축적된 조사강도가 겨울보다 훨씬 더 높은 것을 알 수 있다.



그림 29: 계절별 하루 동안의 조사강도 변화.

그림 30은 2019년 8월에서 12월까지 기상 데이터의 분석에 근거하여 조사량의 변화를 나타내는 선도표(line chart)를 그린 것이다. 청명한 날 일조량 자원이 좋을 때, 하루 중 모듈 전면에서의 축적 조사량이 후면에서보다 훨씬 더 많은 것을 볼 수 있다. 흐린 날 조사량이 좋지 않을 경우에는 모듈 전면과 후면에 축적된 하루 중 조사량 차이는 더 적어진다.





그림 30: 전면과 후면 사이의 일간 일조량 변화.

8월과 9월에 수집된 양면형 모듈(공칭 출력: 345 Wp)의 데이터는 다음과 같이 분석되는데, 양면형 모듈의 일간 성능비는 다음과 같은 성능비 계산 공식으로 계산한다.

$$PR = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_i}{\sum_{i=1}^{N} G_i} \cdot \frac{G_{STC}}{P_n}$$
(8)

 P_i : Measured power of module G_i : Measured irradiance G_{STC} : Irradiance under STC P_n : nominal power of module





그림 31: 양면형 모듈의 에너지수율과 PR.

공칭 출력 345 W 양면형 모듈의 일간 에너지 생산은, 청명한 날에는 약 2 kWh 이고 흐린 날에는 약 0.5 kWh 이다. 동시에 양면형 모듈의 하루치 성능을 비교하면, 청명한 날은 일일 에너지 생산이 더 많고 모듈 성능비는 보통 약 80 %이다. 양면형 모듈의 일일 출력 생산이 적으면 양면형 모듈의 하루치 성능비는 도리어 증가함을 확인할 수 있다.



3 태양광기술에서의 에너지 기상학

3.1 기후대 시스템과 태양광 특정 기후대 정의

전세계 태양광모듈의 설치가 급증함에 따라 기후 스트레스 요인에 대한 이해도 증진이 모듈 부품의 수명을 늘이는데 매우 중요해 지고 있다.

기후대 등급(climatic zone ratings)이 특정 위치에서의 일반적인 기상 패턴에 대한 간편한 분류 방식으로 떠오르고 있다. 대부분의 시스템은 통상적으로 지역의 연간 온도와 습도를 토대로 기후를 분류한다. 기후대 분류에 있어서 주요 차이점은 각 지역의 분류기준과 분류에 사용된 스트레스 요인이다.

3.1.1 Köppen-Geiger 기후대

기후분류에서 가장 널리 사용되는 스트레스 요인은 온도와 습도이다. 기후분류 시스템 여러 분야에서 광범위하게 받아들여 사용하고 있다. Köppen-Geiger(KG) 분류는 가장 흔히 사용되고 있다. 이 시스템은 1884년 Walidmir Köppen[59]에 처음 소개되었고, 1951년 Rudolf Geiger 에 의해 보다 개선되었다[60]. KG 분류는 세계를 5 개 - A, B, C, D, E, (적도 Equatorial, 건조 Arid, 따뜻 온대 Warm Temperate, 눈 Snow, 극지 Polar) - 의 주요 기후 그룹으로 구분한다. 주요 그룹들은 2 글자를 추가하여 다시 분류한다. 2 개의 추가적인 범주는 강수량(precipitation) (W, S, f, w, sm) 과 온도 (h, k, a, b, c, d, F, T)이다. 각 분류 그룹의 기준은 특정 지역에서 성장하는 나뭇잎의 유형을 근거로 한다[59]. 그래서 Dfa 기후는 연중 강수량이 있고 뜨거운 여름이 있는 눈이 많이 내리는 기후이다. 그 기준은 비록 나뭇잎 성장을 토대로 하지만 그 결정은 연중 온도변화와 강수량 측정에 의해 이루어진다. 예를 들어, D 기후는 가장 추운 달의 평균온도가 3°C 이하이다. 현재의 분류 기준은 표 17과 같다. 기후분류는 현재의 기후조건을 대표할 수 있도록 정기적으로 갱신한다[16, 61]. 현재 서로 다른 위성 기상데이터를 가지고 만든 여러 가지 Köppen-Geiger 지도가 있다[60, 62-64]

또한, 고해상도 기후 지도는 적도에서의 해상도가 1km 에 접근하고 있다[65]. 해상도를 높이고 분류에 사용된 데이터의 품질을 높이는 것 외에 그룹들은 분류기준을 개선하였다. Peel 등은 Russel 등[63, 65, 66]의 제안을 받아들여 주 기후분류에 대한 기준을 개선하였다. C/D 기후를 분류하는 임계치는 -3°C 에서 0°C 로 증가되었다. Beck 등은 강수 구역에 약간의 수정을 가하였다[63]. B 기후의 강수량 지역은, 강수량의 70 %가 여름 혹은 겨울에 해당하는 달에 내리는지를 서술하는 것으로 바뀌었다. 끝으로 C & D 기후의 강수 구역은 강수량의 대부분이 겨울에 내릴 때는 s 를, 그렇지 않을 때는 W 를 줌으로써 상호 배타적으로 만들어졌다.

태양광산업에서도 역시 현장에서의 필수적인 발간물에 KG 가 사용되고 있다. 많은 그룹들이 시료의 옥외노출 분류에 KG 를 사용한다[67-72]. Jordan 등은 KG 기후대를 기준으로 사막, 덥고 습한, 중간 및 눈으로 정의된 기후대와 열화율 사이의 관련성을 평가하기 위해 전세계적으로 11,000개 이상의 열화율에 대한 광범위한 데이터베이스를



구축하였다[73]. 서로 다른 기후에서 태양광모듈의 작동조건에 대한 연구가 Kohl 등에 의해 수행되었으며, KG 스킴[74]에 따라 지상 측정을 한 4 개의 특정 위치를 해양, 중간, 건조, 고산 및 열대로 명명하였다. Infinity 프로젝트에서 Eder 등은 열대, 건조, 중간, 고산 의 KG 기후대를 매칭시킴으로써 실제 기후조건과 관련되는 옥내시험용의 포괄적 분류를 설계하였다[75].

KG 스킴의 기반은 비록 태양광기술의 성능과 열화에 직접 관련되지는 않지만, 인간이 알고 있는 것처럼 기후대에 대한 논리적인 정의를 규정하고 있다. 예를 들어, KG 는 사막 지역(높은 온도와 적은 강수량)을 잘 정의하고 있는데, 일반적으로 혹독한 조건의 위치 또는 낮은 온도와 연중 강설 가능성이 높은 극 지방의 위치를 식별한다. 그러나 아직 규격화된 정의가 내려진 바가 없어 기후대는 그룹에 따라 달라진다. 이러한 이유로 과학 그룹들이 태양광기술에 적절한 기후대를 정의하기 위한 다른 접근방법에 대해 연구하고 있다.

3.1.2 INFINITY 기후 특성별 가속 노화시험 절차

INFINITY 프로젝트의 틀 내에서 G. Eder 등은 태양광모듈의 열화모드를 특정 기후대에 연관시키는 첫 번째 접근방법을 제의하였다[75]. 그들은 KG 기후대를 토대로 한 옥내시험 절차용 기후분류를 설계하였다.

매트릭스는 기후를 5 개의 서브존 - 중간 Moderate, 열대 Tropical (x3), 건조 Arid (x3), 고산 Alpine (x3) - 으로 정의하였다. 각 기후대별로 기간이 다르고 스트레스의 크기도 다르게 나타나 있다. 노화시험은 스트레스로, 온도, 습도, 조사량, 동적 기계적 부하, 열사이클, 염분 및 모래를 포함한다.

3.1.3 KG 태양광 기후분류 스킴

KG 스킴의 확장과 단순화 작업을 위해 문헌 [38]에서는, KG 스킴의 새로운 층으로 태양에너지 자원이 포함되어 있다. 격자모양의 글로벌 데이터를 사용하여, 온도, 강수량 및 조사량을 결합하여 2 글자로 정의된 12 개 기후대를 가진 Köppen-Geiger-Photovoltaic (KGPV) 스킴을 새로이 만들었다. 첫 글자(*TP*-zones)는 KG 기후대의 기준에 바탕을 둔 것이다. 주요 기후대는 다시 라벨을 붙였음을 주목해야 하는데, 기존 스킴에서의 건조 Arid zone (B)을 새로운 스킴에서는 B-사막 desert 와 C-스텝 Steppe 의 2 개 주요 기후로 나누었다. 이처럼, *TP*-zones 은 - A-열대 Tropical, B-사막 Desert, C-스텝 Steppe, D-온대 Temperate, E-추운 Cold, F-극지 Polar - 기후로 정의되어 있다. 두 번째 글자 (*I*-zones)는 글로벌 수평면 조사량을 고려하고, 지역을 4 개존 - L-Low, M-Medium, H-High, K-조사량이 매우 높은 Very High irradiation - 으로 정의하고 있다. *I*zones 을 구분하는데 L-M 사이는 1130 kWh/m², M-H 사이는 1560 kWh/m², 그리고 H-K 사이는 2070 kWh/m²을 기준으로 한다.

KGPV 스킴은 또한 인구밀도와 지표면 비에 의존하는 가장 적절한 기후대 선택을 포함하고 있는데, 이를 통해 가능한 기후존의 개수를 24 개에서 12 개로 줄일 수 있다. 그림 32는 KGPV 기후분류의 결과를 나타낸 것인데, Mendeley 데이터세트로 온라인에서 접근 가능하다.



표 11: Köppen-Geiger 기후분류 기준. 특정 연도의 온도와 강수량 값과 함께 이 표를 사용하여 어떤 지역의 기후분류를 계산할 수 있다. P_{smin}, P_{wmin}, P_{smax}, P_{wmax} 는 여름과 겨울철, 최소와 최대 강수량을 나타낸다. T_{min}, T_{max}, T_{ann}, T_{mon} 는 각각 최소, 최대, 연간, 월간 온도를 나타낸다. 온도 단위는 °C, 강수량 측정 단위는 mm 이다. 그리고 Pth 변수는 연간 온도를 기준으로 B- 건조 존에 대해 계산한 것이다. Kottek 등[16].

그룹	유형	서브 유형	설명	기준	
	f		Rainforest	P _{min} ≥ 60 mm	
	m		Monsoon	$P_{ann} \ge 25 (100 - P_{min}) mm$	
$T_{min} \ge \pm 10$ C	W		Savanna	$P_{min} < 60 \text{ mm}$ in winter	
-	W		Desert	P _{ann} ≤ 5 P th	
B – Arid	S		Steppe	$P_{ann} > 5 P^{th}$	
$P_{ann} < 10 P^{th}$		h	Hot	T _{ann} ≥ +18°C	
		k	Cold	T _{ann} < +18°C	
-	S		Dry Summer		
	14/		Dry Wintor	$P_{smax} > 10 P_{wmin}$	
	vv		Dry Winter	$P_{wmin} < P_{smin}$	
C - Temperate -3°C < T _{min} < +18°C	F		Without dry season	Not Cs or Cw	
		а	Hot Summer	T _{max} ≥ +22°C	
		h	Warm Summor	T _{max} < +22°C,	
		D	Wann Summer	$4 T_{mon} \ge +10^{\circ}C$	
				$T_{max} < +22^{\circ}C,$	
		С	Cold Summer	$4 T_{mon} \ge +10^{\circ}C$,	
				T _{min} > - 38°C	
				$P_{smin} < P_{wmin}$,	
	S		Dry Summer	$P_{wmax} > 3 P_{smin},$ $P_{smin} < 40 mm$	
D – Cold (Continental) T _{min} ≤ -3°C	14/		Dry Winter	$P_{smax} > 10 P_{wmin}$	
	vv		Dry Winter	$P_{wmin} < P_{smin}$	
	F		Without dry season	Not Ds or Dw	
		а	Hot Summer	T _{max} ≥ +22°C	
		b	Warm Summer	$T_{max} < +22^{\circ}C,$ 4 $T_{mon} \ge + 10^{\circ}C$	



		С	Cold Summer	T _{max} < +22°C, 4 T _{mon} < + 10°C, T _{min} > - 38°C
		d	Very cold Winter	$T_{max} < +22^{\circ}C,$ 4 T _{mon} < + 10°C, T _{min} \leq - 38°C
E – Polar	Т		Tundra	T _{max} ≥ 0°C
$T_{max} < +10^{\circ}C$	F		Frost (ice cap)	T _{max} < 0°C
B-건조 기후대에서의	P th 계	산		

	2{T _{ann} }	연간 강수량의 최저 2/3 가 겨울에 발생한다면
P th	2{T _{ann} }+28	연간 강수량의 최저 2/3 가 여름에 발생한다면
	2{T _{ann} }+14	그 외



그림 32: 12 개의 가장 적절한 기후대를 가진 Köppen-Geiger-Photovoltaic 기후분류 (남극은 배제). 첫 글자는 온도-강수량(TP)-존: A-열대, B-사막, C-스텝, D-온대, E-추움, F-극지. 두 번째 글자는 조사량(Irradiation) (I)-zones: K-매우 높은, H-높은, M-중간, L-낮은 조사량 (Source: [76]).

또한 KGPV 기후대를 태양광모듈의 열화율 시뮬레이션과 연관시켰다. 문헌 [20]에서 온도, 자외선 조사량 및 상대습도를 토대로 Kaaya 등[76]이 제의한 물리적인 모델을 사용하여



단결정실리콘 태양광모듈의 열화율을 계산하였다. 그림 33에서 각 KGPV 존별 열화율의 공간적 분포는, 더 추운 지역에서의 자연 열화율이 낮은 것뿐 아니라 열대와 스텝 기후에서 기후 스트레스가 태양광모듈에 미치는 명백한 높은 확률을 보여주고 있다.



그림 33: KGPV 기후대 측면에서 전체 열화율의 공간적인 분포. 기후대별로 총 열화율의 평균은 각 라벨 아래에 연간 %로 표시되어 있다(Source: [20]).

3.1.4 태양광 열화 기후대

T. Karin 등에 의해 태양광모듈에 미치는 기후 인자들의 영향을 평가하기 위한 대체 방안이 제의되었다[35]. 이 기후분류 스킴은 특정 스트레스 인자들에 바탕을 둔 것인데, Arrhenius-가중 평균 모듈온도, 열 사이클링 측정의 하나로 평균 모듈온도 변화율, 고온고습 측정의 하나로 극히 낮은 주위온도, 바람 스트레스, 특정 습도와 자외선 노출이 그 인자들이다. 이 스킴은 각 기후 스트레스 요인(온도, 습도, 풍속)별로 임계치를 설정하고 각각 글자 키를 부여한다. 소위 "태양광 열화 기후대(Photovoltaic Degradation Climate Zones: PVCZ)"는 모듈 장착 배열형태와 활성화 에너지별로 계산된 Arrhenius-가중 모듈온도에 의존하는 첫 글자와 특정 평균 습도 수준에 의해 결정되는 두 번째 글자로 정의한다.

주요 기후 변수와 기후대를 시각화하고 확보하기 위한 목적으로 편리한 기능이 온라인에 제공되어 있다(https://pvtools.lbl.gov/pv-climate-stressors) [77].

3.1.5 357 개 태양광 사이트의 위성 기상데이터를 사용하여 Köppen-Geiger 기후분류의 개선과 확대

최근 Wieser 등은 357 개 태양광 사이트의 위성 기상데이터를 가지고 Köppen-Geiger 기후분류를 평가하였다[78]. 할당된 기후대는 비교적 매우 정확한 것으로 알려졌다. 각 기후대별 측정 기상 변수들은 각 분류별로 설정한 기준과 일치하는 것으로 확인되었다. 약간의 수정을 위해, Wieser 등은 B, C 및 D 기후별로 온도 존을 나누는 임계값을 증가시킬 것을 제의하였다. Bh/Bk, Ca/Cb 및 Da/Db 분할 시 임계값을 1℃ 내지 2℃ 올리면 그 기준이 각 기후대별로 온도값의 실질적인 군집형성을 더 잘 반영할 것이라는 견해이다(그림 34 참조).

Wieser 등은 Ascencio-Vasquez 등이 제안한 조사강도 범주를 이행하는 것뿐 아니라 수분 응축의 측정으로 강수량 분류를 대체할 것을 제안하였다[38]. 수분 응축은 강수량 보다 모듈의 열화와 더 밀접하게 관련이 있다. 이런 효과는 PET 필름의 옥외 노출 동안에 나타난다[71].

모듈 후면에서의 수분 응축 빈도는 모듈온도, 상대습도 및 주위온도로부터 계산할 수 있다. 할당된 강수량 범주와 응축이 발생한 일 수 사이에 어떤 명확한 연관성은 발견되지 않았다. 그래서 Wieser 등은 25th, 50th 및 75th 4 분위수를 기준으로 이슬이 발생한 연간 일수를 토대로 한 4 개의 범주를 제정하였다.

KGPV 조사강도 등급 분류를 실제 KG 기후대에 통합하기 위한 연구가 진행 중에 있다.





그림 34: B, C 및 D 기후별 연 평균 최대 온도의 분포. 수평선은 현재의 분류기준을 나타낸다. 온도 존들 사이에 중첩이 상당하다.

3.1.6 기후대 결정 도구

많은 그룹들이 기후대 결정에 사용되는 표를 만들었다. KG 기후대는 Comprehensive R Archive Network (CRAN)[79]에서 구할 수 있는 kgc R 팩키지를 사용하여 빠르고 효과적으로 결정할 수 있다. 그리고 Köppen-Geiger 태양광 기후대(Photovoltaic Climate Zones)는 Mendeley[80]가 운영하는 공개 데이터세트로 찾을 수 있다. 주요 기후 변수들과 기후대를 시각화할 수 있는 태양광 열화 기후대는 온라인에서 찾을 수 있다[77].

3.1.7 결론

비슷한 기후를 가진 장소들을 그룹으로 묶기 위해서는 기후분류가 필요하고, 그리고 기후가 태양광기술의 성능과 열화에 어떻게 영향을 미치는지 이해하는데 도움을 줄 수 있다. 가장 널리 사용되는 스킴은 Köppen-Geiger 기후분류이다. 이 스킴은 지구를 5 개의 주요 기후로 나누는데, 태양광 커뮤니티의 여러 연구 프로젝트의 출발점과 지원 역할을 하고 있다.

그러나, KG 스킴은 단순히 온도와 강수량만을 포함하므로 태양광기술용의 특정 기후대를 제정하기 위해 글로벌 조사강도, 자외선 조사강도 및 풍속 같은 기후 변수들을 포함하는 여러 접근이 시도되었다. Infinity 프로젝트의 틀 내에서 4 개의 주요 기후를 고려한 옥내 노화시험용의 스킴이 제안되었다. 글로벌 접근방식에서 PVCZ 스킴은 Arrhenius 법칙에 기초한 태양광모듈의 열화를 이해하는 것을 목적으로 하고있고, KGPV 스킴은 지도에서 새로운 층으로 조사량을 포함시켜 KG 기후분류를 확대하게 된다.

태양광기술의 성능과 열화에 미치는 기후의 영향을 이해하기 위한 노력은 큰 진전을 보였으나, 여전히 현장에서 관찰한 열화 모드와의 상호관련성이 요구되고 있다.

기후분류는 다양한 측면의 문제점을 내놓는데, 그 해결책은 특정성, 정확성, 단순성 및 적용가능성 사이에서 균형을 찾아야 한다.



3.2 분광 분포와 태양광 성능

출력등급과 에너지등급용의 글로벌 분광 조사강도의 기준은 IEC 60904-3에 정의되어 있는데, 에어매스 1.5 (AM1.5G)에 37°경사각 표면에서 천정각 48.19°와 분광 조사강도 1000 W/m²이다. 현장의 작동조건 하에서, 분광 조사강도 분포는 이론적인 표준 스펙트럼과는 다르다. 이런 차이르르 보여주는 사례가 그림 35인데, 여기서는 4 개의 위치를 대상으로 일년간 AM1.5 기준 스펙트럼을 실제 스펙트럼 측정과 비교하였다[40].



그림 35: 4 개 시험 사이트의 연 평균 태양광 분광 조사강도와 AM1.5 분광 조사강도 (Source: [40]).

지역의 스펙트럼이 표준 스펙트럼으로부터 벗어나게 되면 에너지수율과 성능에 영향이 미치는데, 그 정도는 태양광기술에 따라 달라진다[81]. 실제로, 분광분포는 특정 위치에서 조사강도와 온도를 제외하고는 주어진 태양광기술에 가장 중요한 영향을 주는 인자들의 하나로 여겨진다[28]. 최근, Lindsay 등은 태양광 발전소를 모델링하는데 분광과 각도 영향을 고려하는 것이 중요함을 보고하였다[82]. 예측된 태양광의 성능은, 단지 글로벌 수평면 조사강도만을 고려했을 때에도 실제 성능과 15 %까지 달라질 수 있다. 해당 지역에서의 스펙트럼 역시 에너지 프로젝트 비즈니스 모델내 불확도 요인 중 하나이다[83].



태양광모듈 성능에 미치는 분광 변화의 영향을 평가하기 위해 몇 가지 지표들이 도입되었는데, 태양광기술에 영향을 미치는 스펙트럼 평가용 인덱스와 방법들을 체계적으로 검토하여 목록을 작성한 Rodrigo 등의 문헌에서 해당 적용 사례를 볼 수 있다[84]. 주어진 인덱스의 일부는 포톤의 평균 에너지(Average Photon Energy: APE)같이 잘 알려진 것으로 소자와는 무관하다. 일부 지표는 소자별 특정성을 고려한다. 단일 파라미터에 대한 상세 설명, 각 파라미터들의 장단점과 함께 각 공식은 문헌 [84]에 제공되어 있다.

APE 는 파장의 함수인 분광분포를 하나의 단일 숫자로 줄인다[85]. 이는 정의된 파장 $밴 = (\lambda_{Min} \ arrow \lambda_{Max})$ 내에서 스펙트럼의 평균 포톤에너지를 계산한다. 그러므로 분광 조사강도 Ei (λ)의 적분은 수치적으로 적분한 포톤 플럭스 밀도 ϕ i (λ)로 나누어진다. 여기서 변환 인자 q_e 는 단위 전하이다.

$$APE = \int_{\lambda_{Min}}^{\lambda_{Max}} E_i(\lambda) d\lambda / q_e \int_{\lambda_{Min}}^{\lambda_{Max}} \phi_i(\lambda) d\lambda$$
⁽⁹⁾

이 수치는 STC 에서의 기준 스펙트럼과 비교하여 측정한 태양광 스펙트럼이 단파장 이동(blueshift) 혹은 장파장 이동(redshift) 되었는지에 대한 정보를 제공한다. 입사광의 APE 증가, 즉 청색광이 풍부한 스펙트럼은 a-Si 같이 밴드갭이 넓은 태양광모듈의 성능 증가를 가져오고, 밴드갭이 더 낮은 태양광모듈의 경우는 성능의 감소를 가져온다[86]. APE 의 감소는 반대 효과를 가져온다. 그러나 다결정실리콘(poly-Si) 태양광모듈은 분광 변화에 대한 감도가 덜하다. 그 성능비의 변화는 입사 스펙트럼 전체에 걸쳐 5 % 이하이다. 마찬가지로, Schweiger 등은 결정질실리콘과 대부분의 Cl(G)S 모듈 기반의 단일접합 태양광모듈은 특정 조사 지역(독일, 쾰른)의 실험 상황 하에서 분광분포 변화 에 비교적 안정한 것으로 나타났다고 보고하였다[87]. 그리고 a-Si 과 CdTe 경우에는 각각 3 %와 1% 이하의 분광 인자에서 출력 이득이 발생하였다고 보고하였다. .

최근, 유사한 결과가 일본의 3 개 사이트에서 발견되었는데, 대표 APE 값은 약간 달랐다[88]. STC(그리고 단결정실리콘 태양전지 대비)에 비하여 측정과 계산에 의한 분광 및 조사강도 가중 분광 전류의 이득/손실에서는, CIS, CdTe, perovskite 및 a-Si 태양광기술(지역에 따라 CIS 는 대략 1%, a-Si 은 최대 7 % 까지)에서 연간 분광 이득을 보여주었고, 반면에 후면 접촉(back contact: BC) 단결정실리콘과 진성 박막층을 가진 이종구조(heterostructure-with-intrinsic-thin-layer: HIT) 태양광기술에서는 아주 작은 분광 손실(1 % 이하)을 보여주었다. 2017년까지 다양한 연구에 대한 개요는 문헌에 소개되어 있다[84]. 분광 분포를 대표하는 값으로 APE 의 글로벌 독특성은 다른 연구자들 사이에서 논의 중에 있다[89-91]. 다른 연구에서는 동일한 기술에 적용된 동일한 APE 값을 가진 스펙트럼이 성능 지표에서 상이한 결과를 보여준 바 있다[22, 88, 92, 93].

표준 스펙트럼과 비교하여 지역 스펙트럼에 의해 유발된 분광 이동이나 분광 불일치(SMM)를 정량화 하는 직관적인 방법은 각각의 단락전류 /_{sc} 를 비교하는 것이다. 그러므로 입사 태양광 스펙트럼은 반드시 알아야한다. 전류값은 분광응답(SR)을 이용하여 계산하거나 아니면 실험적으로 결정할 수 있다. 분광불일치와 분광 인자(spectral factor: SF)는 둘 다 특정 기술별로(첫 지표는 추가적으로 하나의 기준을 사용함) STC 에서의 기준 스펙트럼 대비 분광 변화에 따라 단락전류값에 이득 혹은 손실 백분율을 제공한다.

표준 스펙트럼으로부터 벗어나면 연간 에너지수율의 예측에 불확도를 가져오게 되는데, 그 범위는 위치와 모듈기술에 따라 1 % 이하에서 8.8 %(밴드갭이 넓은 a-Si) 까지이다[84]. 이 불확도는 더 높아질 수 있는데, CdTe 모듈의 경우 일간 에너지수율



예측에서 15 %까지 이른다[94]. 이 불확도를 줄이기 위해 모델뿐만 아니라 점점 더 많은 일련의 실험적 스펙트럼 데이터들의 사용이 가능하다.

Ascencio-Vásquez 등은 한 연구에서 Köppen-Geiger 기후분류를 토대로, 청명일의 태양광시스템 성능에 대해 전세계 맵핑을 소개하였다[38]. 다만 이 분류는 결정질실리콘용으로 만든 것이고 경험적인 방법을 사용하여 분광 불일치를 고려하고 있다. 이 방법은, POA 효과를 고려한 글로벌 수평면 조사강도를 얻기 위해 청명 지수와 AM 에 의존한다. 그리고 2100년 까지 예측된 기후변화로 인해 나타날 기후변화도 고려하고 있다. Belluardo 등은 전세계 124 개 지역을 커버하는 광범위한 규모로 스펙트럼을 시뮬레이션하였다[95]. 분광 인자에서의 손실은 3 %까지 그리고 결정질실리콘 기술의 연간 수율에서는 2 %의 이득이 있는 것으로 밝혀졌다. 여기서 최대값은 조사 지역에 따라 다른 것으로 확인되었다. CdTe 와 CIGS 박막기술은 이득 혹은 손실이 더 크고, 비정질실리콘에서는 가장 큰 10 %의 손실과 이득을 보인다. 박막기술에서는 위도에 따른 패턴이 발견되었는데(북에서는 손실, 남에서는 이득), 이는 결정질실리콘에서 발견된 균질성과는 상반된다. 이 보고서 저자들은 데이터의 분산 때문에 APE 의 사용을 권장하지 않는다.

실험적으로 확보한 장기간의 스펙트럼 데이터는 귀하지만, 위성 기반의 스펙트럼 조사강도 데이터는 CMSAF 혹은 NREL 사이트에서 구할 수 있다. Huld 와 Amill 는 위성 데이터에 기반한 전세계를 망라하는 연구에서, c-Si 과 CdTe 모듈의 경우에는 Belluardo 등의 연구에서와 같은 범위의 이득과 손실을 보고하였다[96]. 고도가 높고 온도가 낮은 지역에서의 결과 보고에 따르면[96] 이 일반적인 결과는 유효하지 않음을 주목하여야 한다. 저자들은 두 기술에서 약 -8 %로 감소폭이 더 커진 것은 해당 위치의 공기 중 수증기 양이 매우 낮기 때문으로 추정한다.

단일접합 태양전지는 보통 직렬연결 방식으로 전류에 제한이 있으며 탠덤 태양전지는 분광 변화에 의해 영향을 받는다. 하나의 서브셀에 적절한 파장 범위에서 입사 스펙트럼이 감소하면 전류가 낮아진다. 더 낮아진 그 전류값이 만약 가장 낮다면, 다른 서브셀에서의 이득과는 무관하게 탠덤 태양전지의 전체 전류를 제한하게 된다. Köppen 기후분류 범위에 속하는 다른 지역들을 비교하는 시뮬레이션에서, 주로 지역의 스펙트럼 영향에 의해 perovskite/CIGS 탠덤 태양전지의 연간 수율이 평균 3.5 % 감소하는 결과를 보여주었다[97]. 이는 2-단자(직렬연결, 분광 변화가 전체 전류를 제약)와 4-단자 탠덤 모듈을 비교한 결과이다. Liu 등은 손실을 최소화하기 위해 탠덤 태양전지의 전류를 지역의 분광 조건에 매칭할 것을 제안하였다[98].

위에서 언급한 문헌 외에, 박막[99-101]과 다중접합(양면형 포함) 모듈에서 분광 분포를 고려한 출력 산출량을 염두에 둔 일부 모델과 알고리즘들이 개발되고 발간되었다. 문헌에서는 분광 영향 인자(spectral impact factor: SIF)도 소개되었는데, 이는 조사강도 가중치를 고려한 분광 불일칭 인자의 평균에 해당한다[102]. 이 인자를 최근 한 논문에서는 "분광 이득과 손실 인자(spectral gain & loss factor)" 라고도 부른다[88].

3.3 데이터 포맷과 기준 데이터세트

태양광시스템 에너지수율의 정확한 추정에는 기상 패턴과 연도와 연도 사이 및 매년 기상상태의 변화를 고려할 수 있도록 해당 지역의 장기 기후와 태양에너지 자원 데이터가 필요하다[8]. 반면에, 서로 다른 태양광기술의 성능을 편견없이 비교하는 것을 목표로 하는 에너지등급 연구는 이 보다 훨씬 짧은 기간의 데이터세트로 수행 가능한데, 이 데이터는 대상 지역을 대표할 수 있어야 한다.



2018년, IEC 는 Part 4 "*Standard reference climatic profiles*"를 발간함으로써 규격 61853 "*Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating*" 시리즈를 완성하였다. 이 규격은 어떤 지역에서의 에너지등급을 수행하기 위해 필요한 일년 이상의 기후 정보를 제공한다. 그리고 전세계에 설치된 태양광시스템에 영향을 미치는 환경 조건을 대표하는 6 개의 다른 기후 프로필을 포함하고 있다.

IEC 61853을 적용하여 얻는 최종 결과물이 각 기후 프로필의 기후 특성에 따른 에너지등급(Climate Specific Energy Rating: *CSER*) 값이다. *CSER* 은 무차원의 파라미터로 모듈 효율을 STC 에서 측정했을 때 얻어지는 에너지수율 대비 각 표준 데이터세트에서 정의된 작동 조건에서 추정된 에너지수율의 비에 해당한다. 여기에 대한 상세한 설명은 4.1 장에 제공되어 있다. 여기서는 표준 기준 데이터세트를 대상으로 한다.

에너지등급 연구에 필요한 표준 기후 데이터세트를 정의할 때 고려해야 할 2 가지 주요 측면은 다음과 같다[13].

- a) 변수들과 시계열의 길이 측면에서 얼마나 많은 데이터들을 포함하는지
- b) 기후 프로필은 실제 데이터에 기반하는데, 모든 범위와 전세계 태양광기술의 지리적 변화를 대표하기 위해서는 어떤 지리적 위치의 데이터세트를 사용해야 하는지

데이터세트에 포함된 변수들은 에너지등급 추정용으로 사용된 모델들과 가용한 데이터 사이 균형의 결과이다. 어떤 기술에 유리하거나 불리하지 않도록 양쪽 요소들이 모든 기술에 대해 적절하고 편향적이지 않아야 한다. 동시에 사용자들에게 정확하고 실제적인 정보를 제공할 수 있어야 한다.

태양광 소자의 성능을 모델링하는 많은 방법들이 과학 문헌에 나와 있지만 국제적인 규격에 포함된 것들은 단순성과 정확성 사이에서 절충해야 한다. 정확성은 대부분의 경우 요구되는 입력 데이터에 의해 제약을 받는다. 예를 들어, 대륙적인 스케일에서 스펙트럼에 따라 구분된 조사강도의 추정값을 제공할 수 있는 위성기반 데이터 분석법의 개발은 IEC 61853에 사용된 에너지등급 방법에서 분광 보정인자의 이행을 가능하게 한다. 이렇게 함으로써 태양광소자에 의해 흡수된 조사강도를 보다 효과적으로 추정할 수 있게 된다. 이전에는 태양광소자의 성능에 중요한 영향을 미치는 이들 스펙트럼 효과를 체계적으로 고려할 수 없었다. 문헌 [96]에서 설명한 바와 같이 c-Si 과 CdTe 소자들의 추정 에너지수율은 분광 효과 유무에 무관하게 위치에 따라 최고 6 %까지 변한다.

IEC 에너지등급 방법론은 조사강도, 주위온도와 풍속의 함수로 작동 온도를 계산함으로써 태양광소자의 열적 거동도 고려한다. 이는 소위 말하는 대륙적인 스케일에서 기후학적 변수용으로 가용한 데이터세트 덕분에 가능한 것이다.

데이터세트의 크기와 관련하여, IEC 61853 규격의 첫 번째 원고에서는 표준일(standard days)의 사용을 고려하였다. 이 표준일은 모든 가능한 작동 환경을 커버하는 보호막을 만들어내는 극한 조건을 대표한 것이었다. 제시된 6 개의 날들은, 낮은 조사강도- 낮은 온도(LILT), 중간 조사강도-중간 온도(MIMT), 중간 조사강도-높은 온도(MIHT), 높은 조사강도-낮은 온도(HILT), 높은 조사강도-높은 온도(HIHT) 및 보통 조사강도-서늘한 환경(NICE)이다.

그러나 특정 설치장소에서 이들 표준일은 에너지등급의 기본이 되는 에너지수율을 잘 추정하지 못하는데, 이는 [103]에 나타낸 것과 같이 대부분 사이트의 기후조건을 충분히 대표하지 못하기 때문이다. 지역을 잘 나타내는 대표적인 날들을 고려해도 역시 가동 조건을 나타내는 적절한 지표를 제공하지 못하고, 매우 짧은 기간을 사용함에 따라 다른



기술에 비해 특정 기술에게 유리하게 작용할 수도 있다. 그리고 다양한 날들을 고려하여 확보한 결과를 토대로 한 에너지등급 연구가 있지만[104], IEC 규격에서는 반복적으로 신뢰성 있는 등급을 확보하기 위해 최소 일년의 기간을 채택한다. 문헌 [96]에서와 같이 이런 주장은 전년 대비 모듈 성능비의 변화가 작은 것에 의해 뒷받침된다. 성능비는 고려 대상인 모든 지역(아프리카, 대부분의 유럽, 아시아)에서 *CSER* 과 유사한 파라미터로 전세계에서 태양광시스템이 설치된 곳 대부분의 환경을 대표한다. 이를 기반으로, 일 년간의 시간별 데이터는 신뢰성 에너지등급 연구를 수행하기 위한 모든 관련 정보를 포함하고 있다고 동의하게 되었다.

표준 데이터세트를 선택하는데 있어 고려해야 할 두 번째 측면은 다른 기후 지역의 정의이다. 강수량에 크게 영향을 받고 그리고 식물에 미치는 영향을 나타내는 Köppen-Geiger 분류[105], 혹은 에너지등급 목적으로 연간 평균 청명지수[106]를 기반으로 하는 "European Solar Radiation Atlas"에 의해 제시된 차별화 방식 같은 전통적인 기후 지역과는 대조적으로 기준 기후는 태양광모듈의 성능에 기반을 두어야 할 필요가 있다. 단지 조사강도나 혹은 청명 지수만을 고려하는 것은 충분하지 않는데, 예를 들어 온도도 또한 태양광소자의 성능에 중대한 영향을 미치기 때문이다.

만약 하나의 태양광소자가 두 위치에서 같은 CSER 값을 얻는다면, 두 위치에 동일하게 구성한 태양광시스템의 에너지수율은 양 사이트에서 가용한 연간 조사량의 차이에 비례해서 달라질 것이다. 그러므로 이런 경우에는 한 사이트의 데이터에 기반한 성능 추정을, 연간 총 조사강도의 크기만 다르게 고려함으로써 다른 사이트에서의 성능 추정에 사용할 수 있을 것이다. 이처럼, 기준 기후 데이터세트의 정의는 해당하는 지역에 대해서는 유사한 태양광 성능(CSER 혹은 성능비)을 보증할 수 있어야 한다. 이 지역은 장기 데이터(10년 이상)를 기반으로 확인되어야 한다. 그런 다음, 기준으로 선택한 연도는 다년간에 걸친 평균 성능에 가급적 가까운 성능값을 제공할 수 있어야 한다. 끝으로, 전체 지역이나 혹은 기후대를 대표할 수 있는 적절한 사이트를 확인해야 한다. 이 대표적인 사이트의 조사량을 같은 기후 지역 내에 있는 어떤 다른 사이트에서의 수율을 추정하는데 사용할 수 있다.

이전 스텝들을 따라, 문헌 [103]의 저자들은 유럽에서 7개의 다른 기후 지역을 확인하였는데, 지역 간에 c-Si 모듈의 성능 차이가 약 1 %, 모듈 성능비가 0.88~0.96 범위이다. 성능비는 더 높지만(0.93~1.05) 유사한 변화가 CdTe 모듈에서도 관찰되었다. 다른 지역에서 성능의 표준편차는 0.1~0.6 % 범위로 더 낮은 값을 보여주었고, 반면에 조사강도의 편차는 1.5~4 % 범위였다. 이는 일년 기간의 데이터를 고려하면 충분하다는 것을 나타낸다. 완전한 시계열의 통계학적 특성을 가지고 만든 합성 데이터세트 사용의 영향에 대한 분석에서는 태양광소자의 등급은 영향을 받지 않았다고 결론이 내려졌다.

유사하지만, 보다 복잡한 태양광 성능 추정 방법을 적용하고, IEC 61853에 적용된 영향들을 고려함으로써, 문헌 [13]의 저자들은 c-Si 과 CdTe 모듈의 경우 유럽에서 5 개의 다른 지역들을 확인하였다. 입력 데이터에서의 변동성은 성능비 추정에서 약 2 %의 불확도를 가져온다. 그러므로 저자들이 결론을 내린 것처럼, 표준 기후의 기준 데이터세트는 이 값보다 더 낮지 않은 차이를 보증할 수 있도록 정의되어야 한다.

해당 결과들을 감안하면, IEC 61853-4 규격은 전세계에서 태양광시스템이 설치되는 가장 흔한 기후조건을 대표할 수 있는 6 개의 기준 기후 프로필을 고려 대상으로 한다. 그 이름은 열대 습한 tropical humid, 아열대 건조한 subtropical arid, 아열대 해안 subtropical coastal, 온대 해안 temperate coastal, 온대 대륙 temperate continental 및 고지대 high elevation (3000 m 이상)이다.



각 데이터세트는 일년 기간의 시간별 주위온도, 풍속, 위성이 검색한 글로벌 수평면 조사강도와 광대역 직달 조사강도, 면내 글로벌과 광대역 직달 조사강도 그리고 데이터세트에 명시한 바와 같이 폭이 다른 29 개의 밴드로 나눈 면내 글로벌 분광조사강도를 포함한다. 이들 변수 외에, 태양 고도각 및 태양과 모듈면에 수직 방향 사이의 입사각 역시 제공된다.

현재 IEC 61853 규격에서 에너지등급의 범위는 단일접합 단면형 소자를 대상으로 한다. 만약 향후에 양면형 소자가 고려되어야 한다면, 표준 데이터세트는 수정되거나 확장되어야 한다. 새로운 변수들은 새로운 소자의 성능을 모델링하는데 사용되는 방법론과 글로벌 스케일에서의 데이터 가용성에 의존할 것이다.

3.4 아타카마 사막 조건을 고려한 모듈 특성분석

3.4.1 태양광모듈의 옥내 특성분석

IEC61853 Parts 1-4 의 에너지등급 규격은 실제 조건 하에서 태양광모듈의 예상 성능을 구별하는 방법을 제공한다. 다른 기준기후에서의 성능 등급을 산출하기 위해 일련의 종합 측정값들을 수치모델과 결합하는 방식이다[107].

아타카마(Atacama) 사막은 태양광모듈의 선택과 태양광발전소 운영에 있어 여러 가지 도전적인 문제점에 직면할 수 있는 특별한 여건을 갖고 있다. 주요 도전과제의 하나는 태양광 스펙트럼으로, 이 스펙트럼은 ASTM G173 스펙트럼에 완전히 일치하지 않는데(그림 36), 흔히 모듈에서의 일조량 영향과 태양광발전소의 다른 구성품들을 평가하는데 IEC 규격의 사용을 권유받고 있다.

양쪽 스펙트럼 사이의 주요 차이점은 UVA 와 UVB 의 범위에 있는데, UVA 범위에 더 문제가 있다. 이런 스펙트럼 차이의 원인이 되는 핵심 인자는 1) 해수면 위 높이; 2) 구름이 없어 청명한 일수 그리고 이에 따라 확산 일조량의 비율이 낮음; 3) 에어로졸 광학적 깊이가 작음; 4) 총 오존 칼럼(total ozone column; TOC)이 작음; 5) 수증기 칼럼이 작은 점이다. 이 결과는 모듈의 에너지등급이 떨어지지 않게 Atacama 사막에 설치되는 기술이 UVA 범위에서 상당한 에너지를 뒷받침할 수 있도록 설계/선택되어야 한다는 것을 시사한다.





그림 36: ASTM G173과 정규화한 Atacama 사막 태양광 스펙트럼의 비교[108].

사막의 태양광 스펙트럼에 의해 제기된 문제에 대응하기 위해. Atacama ATAMOSTEC(칠레 아타카마 사막에 있는 태양광기술 공익연구소)는 하나의 특정 모듈 기술이 태양광발전소 설치에 적합한지를 결정하는 옥내와 옥외 시험 방법론을 개발하였다. IEC 61853 규격은 아타카마 사막의 조건을 적절히 대표하지 못하므로, 모듈의 옥내 시험절차를 약간 수정하였고 모듈의 실제 가동조건에서 예상되는 자외선 일조량 지수에 맞추도록 몇 가지 시험도 추가되었다[109]. 그림 37은 아타카마 사막의 조건을 고려하여 태양광모듈의 옥내 평가용으로 ATAMOSTE 가 제안한 절차이다. 사전에 인지할 수 있듯이 제안된 절차는, 예상되는 자외선 일조선량에 사막에서의 부식 환경을 추가 고려한 조건에서 평가한 모듈의 성능(UV + salt mist); 예상되는 자외선량 + 온도 움직임(UV + PTC); 예상되는 자외선량 + 고온고습과 고도의 가속 스트레스 시험(UV + DH/HAST)을 출력물로서 제공한다. 이들 시험은 대상 기술이 기대하는 25년 이상의 태양광모듈 수명(가까운 미래에는 모듈의 잠재력을 증가 또는 감소시키는 특징들을 결정할 수 있을 것으로 예상)에 도달할 수 있는지를 결정해 준다. 모듈의 수명을 추정하는 목적은 현재 기술이 자외선 일조량에 아주 민감해서 아타카마 사막 조건 하에서는 수명이 짧을 것으로 예상되기 때문이다. 여기서 ATAMOSTEC 의 핵심은 양면형 모듈 기술에 있음을 주목해야 한다. 하지만 제안된 절차는 단면형 기술의 평가에도 적용될 수 있다.





Fabrication of 63 bifacial mini-modules (4-cell – 36x36 cm²) for encapsulants and interconnections studies:

 \rightarrow n-type HET cells (4BB – glueing – *low T tech.* / INES-CEA) \rightarrow nPERT solar cells (5BB – soldering – *high T tech.* / ISC-KN)

Encapsulant	« bad » EVA	тро	POE1	POE2	POE3	lonomer
Cut-off	Low	Low	Low	High	Low	High
# HET modules	13	13	-	7	-	7
# nPERT modules	-	-	13	-	10	-
« Bad » EVA was inclu	uded in order to	get more se	ansibility on th	e impact of n	ew ageing te	st procedures

그림 37: 아타카마 사막의 환경조건을 고려하여 제안된 옥내 모듈 시험절차의 블록 다이어그램. Source: [109].

일조량의 보완책으로, 그림 37의 절차는 자외선 시험과 조합하여 모듈의 에너지등급에 미치는 오염의 영향, 부식성 환경과 이 둘의 조합의 영향을 결정할 수 있게 해준다. 이들 추가적인 시험을 자외선 시험과 조합하면 모듈 특성분석용으로도 사용할 수 있는데, 왜냐하면 아타카마 사막은 다음과 같은 조건을 보여주기 때문이다. 1) 하루 중 온도 움직임이 -10~30°C(PSDA 에서); 2) 하루 중 습도 변화가 20~100 %(온도 움직임과 결합되면 수분 응축을 일으킴), 3) 염분이 습도와 결합되면 모듈 내에서의 녹이나 수분 응축을 형성하여 모듈의 성능에 영향을 준다. 그림 38은 다른 양면형 기술의 성능을 보여주는데, 특히 다른 봉지재를 사용한 이종접합과 n-PERT 모듈을 비교 평가하였다. 자외선 차단 파장이 높은(high cut-off) 봉지재를 사용한 이종접합 모듈이 다른 기술의 모듈보다 더 좋은 성능을 보여주었다. 그럼에도 불구하고 이런 언급은 PSDA 같은 옥외 조건에서 검증되어야 한다.





그림 38: 다른 봉지재를 사용한 이종접합과 n-PERT 모듈의 평가. 수정된 옥내 시험 절차를 따름(Source [109]).



3.4.2 태양광모듈의 옥외 특성분석

옥내 모듈 평가의 보완책으로 ATAMOSTEC 은 Solar testing facility 에서 옥외 특성분석도 수행하였다. 옥내시험 시설과 같이 발전소 규모의 태양광시스템의 이행을 전제로 모듈들의 순위 평가를 위해 상업용과 비상업용 태양광모듈 시험에 PSDA 를 사용하였다. 그리고 보다 발전된 O&M 관행, 모듈장착 구조 및 인버터 기술들이 사막 조건에 맞는지 확인하는 분석 대상이 되었다. 그림 39는 현재 PSDA 시설을 보여주고 있다. 이 시설들은 최신 평가 장비들로 구성되어 있는데, 기상조건; 경사, 수직 구조 및 실제 환경조건에서 완전한 모듈 시험이 가능한 트랙킹 시스템; 새로운 모듈 개념을 평가할 수 있는 미니 모듈 장착 구조들이다. 보는 바와 같이, PSDA 시설을 이용하여 옥내시험 결과를 검증할 수 있고 또 발전소나 소규모 틈새 시장에서와 같은 특정 활용분야용 모듈기술의 적합성을 평가할 수 있다.



그림 39: Atacama 사막 솔라 플랫폼에 있는 시설.

현재 PSDA 에서는 양면형 PERC+, n-PERT, HJT, 단면형 PERC 기술들이 시험 중에 있다(PERC 기술을 베이스라인/기준으로 채택). 지금까지의 결과, 양면형 기술은 고정 장착구조인 경우 평균해서 약 11 %의 잉여 에너지 이득을 보여주었다. 트랙킹 시스템인 경우는 단면형과 양면형 모두에서 예상한 바와 같이 약 31 %의 추가 이득이 있었다. 따라서 양면형 모듈기술을 단일축의 트랙킹 시스템에 결합한 결과는 약 44 %의 추가 이득을 가져다주었다. 이런 잉여 이득은 약 30 %에 달하는 아타카마 사막의 평균 측정 알베도에 의한 것이다(자연 알베도로 시험 중에 토양을 바꾸지 않음). 그림 40은 위에서 언급한 결과들이 어떻게 상호 관련되는지를 보여준다. 이들 결과들은 에너지 생산에 대한 옥내 특성분석으로부터 얻은 결과들과 부합하는 것이다. 모듈 성능에서 자외선 일조량의 영향과 관련하여서는, 최종 결론을 내리기에는 아직 이르다. 그래도, 사막에 설치된 어떤 모듈에서도 아직 어떤 열화 메커니즘이 일어나고 있다는 것을 보여준 것은 없다. PSDA 에서의 모듈시험은 2020년 1월부터 시작되었다는 것을 명확히 할 필요가 있다.





그림 40: PSDA 에서 측정한 여러 다른 태양광기술의 에너지 이득 사이의 연관성.



4 태양광모듈의 에너지등급

태양광모듈의 평가, 등급 및 가격은 통상적으로, 태양전지 온도 25℃ 와 IEC 60904-3에 명시된 스펙트럼 분포를 가진 태양광의 면내 조사강도 1000 W/m² 로 정의되는 STC 하에서 측정된 최대 생산 출력을 기반으로 평가한다[41]. 그러나 태양광모듈의 수명기간에 생산된 전기량과 그로부터 계산되는 균등화 발전단가(Levelized Cost of Electricity: LCOE) 및 투자수익(return on investment: ROI)은 앞에서 언급한 표준 규격과는 거리가 먼 운전 조건으로부터 계산되는데, 운전조건은 위치와 기후조건 및 설치 상태에 따라 달라진다. 이런 이유로 과학계에서는 실제 운전조건을 대표하는 환경 하에서의 추정 에너지를 기반으로 태양광소자(각 소자의 성능 표면 혹은 매트릭스를 정의함)를 보다 유의미하고 편향없이 비교할 수 있는 방법들을 개발했다. 이와 같은 비교나 에너지등급은 소자들 간의 구별이 가능토록 하기 위한 것으로, 이는 근본적으로 모듈의 특성분석에 의존한다.

미국 Sandia (PVUSA)[110] 혹은 독일 TÜV Rheinland (LPLA)[14]에 의해 개발된 것과 같이 에너지등급에 관한 여러 가지 방법론들을 문헌에서 찾을 수 있다. 그리고 2018년 IEC 는 태양광모듈 에너지등급에 관한 IEC 61853 시리즈 규격을 완성하였다[3-6]. 비록 이들 모든 방법론들은 미리 정해진 운전조건에서의 에너지수율 추정에 기반한 것이지만, 출력 산출량에 사용된 모델과 고려된 영향들은 다르다. 예를 들어, IEC 61853 방법론에 의해 정량화된 영향 외에, LPLA 방법은 오염을 고려하는 반면에 PVUSA 는 인버터의 성능을 고려한 AC 에너지수율을 추정한다. 게다가, 후자의 방법은 소형 어레이부터 발전소 규모까지 서로 다른 유형의 설치에 적용할 수 있는 반면에 IEC 규격은 계산을 단일 모듈에 적용한다.

IEC 61853 방법론과의 비교를 포함하여 이들 방법들과 기타 에너지등급 방법에 대한 자세한 설명을 이번 장에서 제공하고자 한다.

4.1 IEC 61853-3에 따름

IEC 61853 시리즈 규격 "(태양광모듈 성능 시험과 에너지등급(Photovoltaic (PV) module performance testing and enery rating)"은 태양광 제조업체, 설치업체와 구매자에게 다른 기후조건 하에서 태양광모듈의 성능을 추정하는 간단하면서도 실제적인 도구를 제공한다. 규격의 최종 결과물인 "기후 특성에 따른 에너지등급(Climate Specific Energy Rating: *CSER*) 파라미터는 서로 다른 태양광기술 혹은 모듈의 성능을 보다 유의미한 방법으로 비교하는데 사용할 수 있는데, 제조업체가 주장한 생산 출력을 단순 비교하고 STC 에서 측정하는 것은 실제 가동 조건을 결코 충족시킬 수 없다. 실제 무차원의 *CSER* 파라미터는, 효율이 STC 에서 측정되었을 경우 얻을 수 있는 에너지 생산 대비 특정 기후조건 하에서 태양광모듈의 추정 에너지 생산의 비로 계산된다.

에너지등급 *CSER* 의 계산은 일년간의 시간별 데이터를 기반으로 하는데, 이것이 비록 어떤 기후 지역의 조건을 대표하더라도 특정 위치에 설치된 태양광시스템 에너지수율의 정확한 추정이 가능할만큼 충분하지는 않다. 이런 목적이라면 수년간의 기후데이터와 음영, 적설, 모듈위에 먼지 등의 존재 가능성 및 모듈 설치방향, 경사각과 같은 설치 배치 형태를 포함한 특정 사이트의 데이터가 필요할 것이다. 그리고 총 에너지수율의 정확한 추정을 위해서는 태양광모듈과 시스템의 기타 구성품의 열화와 노화 영향도 역시 고려되어야 한다. 이와는 반대로, IEC 61853 시리즈 규격의 목적은 정의된 기후조건을 가진 일반 사이트에 위치한 태양광모듈 에너지등급의 실제적인 추정을 제공하는 것인데, 여기서 모듈은 20°의 경사각으로 적도를 향해 설치되어 있다. 에너지등급 규격에 정의된


추정 방법론은 실제 설치된 태양광모듈의 에너지수율 계산에 적용할 수 있는데, 장애물, 먼지 혹은 적설의 존재로 인한 손실과 열화의 영향이 고려되는 조건 하에서 가능하다. 그러나 이와 함께 광열화에 의한 변화 혹은 열 처리 같은 기타 영향들도 정확한 에너지수율 추정을 위해 고려되어야 하는데, IEC 에너지등급 규격에는 정의도 고려도 되어있지 않다.

최종 두 Part 의 발간과 함께 2018년 완성된 IEC 61853 시리즈 규격은 전세계적으로 태양광시스템용으로 주요 기후조건을 대표할 수 있는 6 개의 데이터세트로 정의된 실제 운전조건을 고려하여 태양광모듈의 성능 추정을 위한 방법론을 정의한 것이다. 이들 기후 데이터세트는 규격의 Part 4에 정의되어 있고[6], 태양광 성능을 추정할 수 있는 모델은 Part 3에 기술되어 있다[5]. 2011년과 2016년 발간된 Part 1과 Part 2는[3, 4], Part 3에서 적용되는 모델에 필요한 입력데이터를 확보하기 위해 태양광모듈의 관련 특성분석을 시험하고 측정하는 절차를 기술한 것이다. 본 보고서의 2장에 기술된 이들 데이터는 다양한 조사강도 수준과 모듈온도(Part 1) 하에서의 최대 생산 출력, 태양광소자의 분광응답, 모듈 표면의 반사율과 모듈의 열적 특성을 포함한다(Part 2).

실제 작동조건에서 태양광모듈의 출력을 추정하기 위해 IEC 61853-3 에 기술된 방법론은 다양한 영향들을 고려한다. 첫 번째, 태양복사와 모듈 법선 사이의 입사각 영향을 반사된 조사강도로 정량화한다. 이 조사강도는 활성 소재를 통과하지 못하므로 출력 산출량에 기여하지 못한다. 두 번째 영향은 활성 소재에 의해 효과적으로 흡수된 조사강도를 결정하는 모듈의 분광응답에 관련된 것이다. 마지막으로 평가된 영향은 온도 거동인데, 받아들인 조사강도와 함께 모듈온도는 출력 산출량에 중요한 영향을 미치는 주요 인자의 하나이다.

실제로 완전한 IEC 61853-3 방법론은, 기준으로 하는 만 일년 동안 시간별로 아래 2 가지 데이터세트를 얻기 위해 위에서 언급한 영향들을 모델링하는데 초점을 둔 여러 단계의 연속과정이다.

- 효과적으로 흡수된 조사강도(*G_{corr}*)를 정의하기 위해 입사각과 스펙트럼 영향을 모두 고려하여 보정한 면내 조사강도, 광대역 및 분리 스펙트럼
- 주위온도(*T_{amb}*), 풍속(v)과 입사각 영향을 고려하여 보정한 면내 조사강도(*G_{corr}*, AO) 를 사용하여 추정된 모듈온도(*T_{mod}*)

유효 조사강도와 모듈온도 (*G_{com} T_{mod}*) 두 가지의 시간별 데이터세트는 규격의 Part 1에서 얻은 출력 매트릭스로부터 유도한 효율값을 바탕으로 출력 산출량을 추정하는데 사용된다(필요할 경우 내삽법과 외삽법을 적용함). 2.1.3 절에서와 같이, 출력 매트릭스는 100~1100 W/m² 사이의 조사강도와 15~75℃ 사이의 모듈온도로 조건을 변화시키며 측정한 모듈 출력 데이터세트이다.

각 기후별로 태양광모듈의 CSER 을 추정하기 위한 완전한 방법론을 나타낸 것이 그림 41이다. 다양한 단계에서 적용된 모델은 다음 절에 기술되어 있다.





그림 41: 기준 기후 프로필별로 태양광모듈의 CSER 을 얻기 위한 완전한 방법론 (Source: Adapted from: [5]).

4.1.1 입사각 영향

첫 번째 단계는 Martin 과 Ruiz 의 모델을 이용한 입사각 영향의 정량화이다[48, 111]. 모델은 각각 아래 방정식 (10), (11)과 같이 직달(beam)(*B*)과 확산(diffuse)(*D*) 조사강도에 대해 보정을 다르게 적용한다.



(d. d.)

$$B_{corr,j} = B_j \cdot \left[\frac{1 - exp\left(-\frac{\cos \theta_j}{a_r}\right)}{1 - exp\left(-\frac{1}{a_r}\right)} \right]$$
(10)

$$D_{corr,j} = D_j \cdot \left\{ 1 - exp \left[-\frac{1}{a_r} \left(\frac{4}{3\pi} \left(\sin\beta + \frac{\pi - \beta - \sin\beta}{1 + \cos\beta} \right) + (0.5a_r - 0.154) \left(\sin\beta + \frac{\pi - \beta - \sin\beta}{1 + \cos\beta} \right)^2 \right) \right] \right\}^{(11)}$$

여기서 *B_j* 와 *D_j* 는 각각 시간 j 일 때의 보정하지 않은 면내 광대역 직달과 확산 조사강도이고, *θ_j* 는 같은 시간 j 에서 태양광모듈의 법선과 태양 사이의 입사각이다. 이 모든 값들은 규격 Part 4에 제공된 데이터세트에 표로 정리되어 있다. *β* 는 모듈의 경사각으로 라디안으로 표시되어 있는데, 이는 20°에 고정되어 있고, *a_r* 은 입사각 실험 측정 분석으로부터 Part 2에서 얻은 경험적 인자이다. IEC 규격은 파라미터 *a_r* 에 대해서는 기준값을 제공하지 않는데, 이 값은 시험의 배치형태나 코팅 하에서 소자에 의존하기 때문이다. 그러나 이 연구에서 분석한 소자에 대해서는 일부값이 보고된 바도 있다[48]. 파라미터 *a_r* 는 공기/유리/a-Si:H/Ag 모듈의 경우 0.136에서 공기/유리/3중 코팅/Si 소자의 경우는 0.179에 이른다. 조사강도는 모듈의 표면에 도달하기 때문에 파라미터 *a_r* 의 값이 높을수록 더 많은 조사강도가 대기 쪽으로 다시 반사된다.

B_{corr, j} 와 D_{corr, j} 의 합은 입사각 영향(G_{corr, AO})에 대해 보정한 글로벌 면내 광대역 조사강도인데, 이는 글로벌 면내 분광 조사강도 R(λ) 에 적용할 입사각 보정계수를 정의하고 그리고 분광 보정 영향 추정에 필요한 해당하는 입사각 보정값들(G(λ)_{corr, AO})을 추정하는데 사용된다. 기준 기후 데이터세트에는 R(λ) 값들도 제공되어 있다.

4.1.2 분광 보정 영향

두 번째 단계는 태양광모듈의 분광응답을 고려하여 효과적으로 흡수된 조사강도를 추정하는 것이다. 시간별 분광 보정 인자는 방정식 (12)에서와 같이 *C_s*로 계산되고, 이를 방정식 (13)에서와 같이 입사각과 분광 영향 *G_{corr}* 둘 다를 고려하여 보정된 면내 조사강도를 추정하는데 적용한다.

$$C_{s,j} = \frac{1000 \cdot \int SR(\lambda) \cdot G(\lambda)_{corr,AOI,j} d\lambda}{G_{corr,AOI,j} \cdot \int SR(\lambda) \cdot R_{STC} d\lambda}$$
(12)

$$G_{corr,j} = C_{s,j} \cdot G_{corr,AOI,j} \tag{13}$$

여기서 *SR(A)* 는 IEC 60904-8 규격의 Part 2에 정의된 것과 같이 다른 파장에서 측정된 분광응답이다[112]. *G(A)*_{corr,AOI}, j 는 시간 j 일 때 입사각에 대해 보정된 글로벌 면내 분광 조사강도이고, *R*_{STC}는 표준 시험 스펙트럼 AM1.5G (IEC60904-3)[41]의 분광 강도이다.

4.1.3 모듈온도의 영향

입사각과 분광 영향(G_{corr})에 대해 보정된 면내 조사강도 외에 모듈의 작동온도(T_{mod})도 태양광 출력 산출량(P_{mod})의 추정에 필요하다. T_{mod} 는 Faiman[113]이 제안한 모델을



이용하여 계산하는데 방정식 (14)와 같이 입사각 영향(*G_{corr, AOI}*)에 대해서만 보정된 입사 조사강도와 주위온도(*T_{amb}*) 및 풍속(*v*)의 냉각효과에 의존한다.

$$T_{mod} = T_{amb} + \frac{G_{corr,AOI}}{u_0 + u_1 \cdot v} \tag{14}$$

모델은 2 개의 열적 파라미터 u_0 와 u_1 를 사용하는데 이는 규격의 Part 2에 기술된 방법론으로 얻은 것이고, 한편, T_{amb} 와 v는 Part 4의 기후 데이터세트에 표의 행태로 제공된다. 반사된 조사강도를 정량화하는데 사용되는 a_r 파라미터와 비슷하게 IEC 규격은 열적 모델에 사용된 2 계수 u_0 와 u_1 의 디폴트값은 제공하지 않는다. 일련의 a-Si, CIS, CdTe 및 c-Si 소자들에 대한 2 계수의 추정값들은 문헌에 보고되어 있다[114]. c-Si 모듈의 경우 u_0 와 u_1 의 값은 각각 30.02와 6.28이다. CdTe 의 경우 계산된 계수들은 23.37과 5.44이다.

4.1.4 출력 산출량

T_{mod} 과 G_{corr} 의 시간별 값을 고려할 때, 시간별 생산 출력 P_{mod} 은 Part 1에서 측정한 출력 매트릭스로부터 유도한 효율의 이중선형 내삽법 혹은 외삽법으로 얻어진다.

6 개의 기준기후 데이터세트의 일부는 태양광모듈의 운전조건이 가끔씩 출력 매트릭스에 의해 커버된 조사강도와 온도를 벗어나므로(2.1.3 절 참조) 외삽법이 필요한 것으로 알려져 있다. 이런 상황의 대부분은 낮은 온도와/혹은 조사강도 수준(*G_{corr}* <100 W/m² 와/혹은 *T_{mod}* < 15°C)에 해당한다. IEC 61853-3은 이런 상황에서 외삽법을 적용할 방정식을 제공한다.

시간별 출력 산출량에서 볼 때, 시간별 에너지 생산(*E_{mod}*)은 매 시간 성능이 일정하다는 가정 하에 유도된 것이다. 이들 시간별 값들의 합계가 아래 방정식 (15)와 같이 차원이 없는 파라미터 *CSER* 의 추정에 사용된 모듈의 연간 에너지 생산 *E_{mod, year}* 이다.

$$CSER = \frac{E_{mod,year} \cdot G_{ref}}{P_{max,STC} \cdot H_p}$$
(15)

여기서 *G_{ref}* 는 그 값이 1000 W/m² 인데, STC 에서의 최대출력 (*P_{max, STC}*)을 측정하기 위해 STC 에 적용된 조사강도이다. *H_p* 는 모든 기준 기후 지역용으로 Part 4에 제공된 연간 글로벌 면내 조사량이다.

다른 기준 기후별로 얻을 수 있는 에너지등급 값들을 명확히 보여주기 위해 다양한 태양광기술에 완전한 방법론이 적용되었다. 사용된 열적 계수(u_0 와 u_1)는 표 12에 있다. 입사각 영향에 대한 모든 기술의 특정 데이터가 부족하기 때문에 모든 소자들에 대해 a_r 값으로 0.155를 고려하였다. 모든 기술에 사용되는 분광응답과 출력 매트릭스 값들에 대한 정보는 문헌에 나와 있다[7].



	c-Si	CdTe	a-Si	OPV
U ₀	26.91	23.37	25.71	26.91
<i>U</i> ₁	6.2	5.44	4.26	6.2

표 12: CSER 을 추정하는데 사용한 열적 계수(u₀ 와 u₁) [7].

얻어진 *CSER* 값들은 그림 42에 있다[7]. 예상한 바와 같이 c-Si 의 성능이 열대와 아열대 기후의 높은 온도에 의해 상당한 영향을 받았다. STC 조건 하에서와 비교할 때, 이런 조건에서 그 성능은 10 % 이상 감소하였다. 이와는 대조적으로 열대 습한 기후조건은 STC 조건에서 측정된 출력 산출량으로부터 예상되는 것보다 a-Si 의 성능을 더 크게 증가시켰다.

최신 태양광기술의 사례로 분석에 포함된 유기태양전지(OPV)는 더 따뜻한 2 개의 기준기후에서 좋은 성능을 보여주었지만, 온대 해안 기후의 특징인 더 낮은 조사강도 조건에서는 성능이 상당히 감소하였다. 이 소자의 상세한 특성분석은 문헌에서 찾을 수 있다[115]. 여기에서 출력 생산은 조사강도 수준이 약 100 W/m² 이상부터 보이기 시작하는데, 이는 낮은 조사강도에서의 성능이 좋지 않다는 것을 나타낸다.



그림 42: IEC 61853-4에 정의된 6 개의 기준기후에서 4 가지 태양광기술에 대해 계산한 CSER (Source: [7]).

그림 42의 결과는 6 개의 기준기후에서 대부분의 대상 소자들의 거동에 명백한 차이가 있음을 보여준다. CdTe 소자의 성능은 대부분의 기후에서 더 안정되어(3.6 %) 보이는데, c-Si, a-Si 및 OPV 소자의 경우 최선과 최악의 기후조건에서의 성능 차이가 각각 9.5 %,



10 %와 23.2 %이다. 이는 각 위치별로 가장 적합한 태양광기술을 선택하는 것이 중요함을 보여준다. 이런 측면에서 아열대와 온대 기후에서 c-Si 과 CdTe 소자의 거동은 추울수록 성능이 증가한 측면에서 비슷하지만, a-Si 소자는 반대의 경향을 보인다.

동일한 기후조건 하에서 소자들 사이의 가장 큰 차이(17 %)는 더 높은 온도와 조사강도 수준을 특징으로 하는 적도의 습한 기후에서 관찰된 것인데, 일부 기술에서는 이것이 반대 영향을 미칠 수 있다. 가장 고른 거동은 아열대 해안 기후에서 관찰된 것으로 소자 사이의 최대 편차가 7.5 %이다. 온대 기후에서 c-Si 과 CdTe 소자의 CSER 값은 출력 산출량 모델링에서 고려한 여러 가지 영향 때문에 매우 비슷하다. 그러나 풍속과 입사 조사강도의 스펙트럼 분포가 고려되지 않으면 이들 두 기술 사이의 성능 차이는 10 % 이상이 될 수 있다[116].

[116] 외에도 에너지등급과 이론적인 에너지수율 추측 연구에 대한 기타 사례들을 여러 문헌에서 볼 수 있다. 대부분의 경우, IEC 61853에서 기술한 것과는 다른 기후 데이터세트뿐 아니라 출력 산출량 추정을 위해 다른 영향들을 고려한 방법론들이 적용되었다. 문헌 [116]에서는 CdTe 와 c-Si 모듈 외에도 CuInSe₂와 Cu(In-Ga)(Se,S)₂도 분석되어 있다. 분광 영향과 풍속에 의한 냉각 영향이 없으면 유럽에서 CIS 와 c-Si 소자 사이의 성능 변화는 2.5 % 미만이고, CdTe 와 c-Si 사이에는 이 차이가 12 %까지 올라가는데 이는 그림 42에서의 변화보다 더 큰 값이다. 추정 성능에서의 차이에도 불구하고 유럽에서 c-Si 에서 얻은 값은 0.87~0.97 범위에서 변하는데, 이는 유럽의 기후조건을 대표하는 기준기후의 경우에 대해서는 그림 42의 결과와 비슷하다.

4.6 장에 상세히 기술된 "선형 성능 손실분석(linear performance loss analysis: LPLA)"[14]을 CdTe, CIGS 및 a-Si 를 포함하는 박막소자와 다양한 코팅을 한 다결정(poly) Si, 이종접합 단결정 Si 및 후면접촉 n-형 단결정 Si 같은 다양한 유형의 Si 소자에 적용하였다. 최선과 최악 성능을 가진 소자 사이의 변화는 일사량이 좋은 따뜻한 기후에서의 30 %에서부터 온대 위치에서는 15 %에 이르는데, 이는 그림 42에서의 차이보다 더 크다. c-Si 과 CdTe 소자 내에서의 차이는 각각 4 %와 2 % 정도로 더 작은 것으로 보고되었다. a-Si 과 CIGS 소자 사이의 변화는 더 크다. 다양한 c-Si 소자들을 비교하였는데[117], 추정 출력 산출량에서의 차이는 2 % 미만이다. 그러나 낮은 조사강도 조건에서는 소자들 사이의 차이가 거의 4 %에 달한다. 다양한 c-Si 와 다중결정(mc) Si 소자를 비교한 연구에서도 유사한 결론이 내려졌다[118]. 특히 조사강도 200 W/m² 이하에서는 c-Si 소자가 mc-Si 소자보다 변화가 크게 나타났지만 성능은 더 좋았다.

필자들은 2 개의 주류 기술인 Si 기반 모듈에서 추정된 에너지수율의 최대 차이는 5 %였다. 적용된 방법론은 IEC 61853 규격에 정의된 것과 매우 유사한데, 역시 광유도 열화를 고려하고 있다. IEC 규격에서 고려된 영향의 대부분은 문헌 [11]에서도 고려되었지만 사용하는 방정식이 다르다. IEC 규격의 *CSER* 파라미터와 유사한 모듈 성능비(module performance ratio: MPR)를 4 가지 태양광기술의 8 개의 다른 소자들을 대상으로 적용하였는데, 고효율 c-Si, CdTe, CIGS 및 a-Si 모듈이다. MPR 에서의 차이는 명확하게 특성이 다른 기술들 사이에서만 두드러졌다. c-Si 소자들의 성능은 상호간에 매우 유사하였다. 위에서 언급한 어떤 연구에서도 IEC 61853-4[6]에 정의된 표준 기준 데이터세트를 고려하지 않았는데, 이는 3.4 장에서 기술한 것과 같이 명확히 차이가 나는 기상조건을 대표하도록 선정한 것이다. 현재 완전한 시리즈 규격을 이용할 수 있게 되어 새로운 소자들과 빠르게 진화하는 태양광기술의 추가 분석이 요구되고 있다.



종합적인 측면에서, CSER 값들은 서로 다른 태양광기술을 비교하는 도구를 제공하고 STC 에서의 최대 출력 산출량보다 실제 성능을 보다 잘 대표하는 간단한 방법으로 동일한 기술의 제품들간의 차이를 구별 가능하게 한다. 이는 또한 태양광 설치업체가 설치하고자 하는 위치의 기후조건에 가장 적합한 기술이나 소자를 확인할 수 있게 해준다.

IEC 규격의 범위는 프로토타입을 포함하여 어떤 태양광기술이든 단면형과 단일접합 소자를 커버한다는 점을 주목하여야 한다. 필요한 입력데이터와 사용한 모델 때문에 에너지등급 규격의 적용은 알베도와 양면형 영향이 정의될 때까지는 양면형 소자에까지 쉽게 확대될 수는 없다. 다중접합 소자의 경우, 변화하는 스펙트럼 조건 때문에 제약을 받게되는 접합의 영향을 확인하는 한 가지 방법이 잘 마련되어 있지만[119], 해당 방법은 에너지등급 규격에 명확하게 정의되어 있지는 않다. 그러므로 에너지등급 규격의 범위를 양면형과 다중접합 소자들이 포함되도록 확대하기 위해서는 새로운 데이터, 이들을 확보하기 위한 실험 설비 그리고 태양광기술에 미치는 다양한 영향들(조사강도와 온도 의존 거동, 분광 영향 및 입사각 영향)을 고려할 수 있는 새로운 방법들이 필요하다. 이런 측면에서 2019년에 발간된 IEC 의 기술 사양(Technical Specification: TS)인 IEC-TS 60904-1-2[55]는 양면형 소자에 대한 출력 매트릭스 측정을 확보할 수 있는 미래 가능한 방법의 토대를 세운 것이다.

IEC 에너지등급 규격의 또 다른 한계는 낮은 조사강도 수준 하에서의 성능과 같이 모델링한 특성분석에서 크게 비선형을 나타내는 기술과 관련된다. 효율이 옥외조건에 장기간 노출됨에 따라 영향을 받는 소자들은 다른 영향들의 고려 때문에 결과적으로 오류가 발생할 수 있으므로 조심스럽게 그 결과를 다루어야 한다. 장기 안정성이 없는 소자들은 실제 수명 성능에 비해 과대평가된 등급을 받을 수 있다. IEC 에너지등급 방법론의 불확도에 미치는 이들 요인과 기타 가능한 요인에 대해서는 5.3 장에서 추가 논의될 것이다.

4.2 태양광모듈 에너지등급 규격 IEC 61853-3의 실행 라운드 로빈

IEC 61853 시리즈 규격 "Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating"은 태양광모듈의 성능, 즉 Part 3에 정의된 CSER 에 대한 표준화된 측정방법을 제공한다[5]. 그러나 계산의 구체적인 이행은 사용자의 역할이고(4.1장 참조), 계산 절차에서의 일부 단계들은 해석의 여지를 남기고 있다. 그리고 CSER 계산의 정확한 이행을 검증하기 위해 사용할 수 있는 기준 파라미터 세트와 규격에 포함된 솔루션은 없다. 이로 인해 서로 다른 계산 사이에 편차가 발생하게 된다. 이런 취지에서 태양광모듈 에너지등급 규격 IEC 61853-3의 라운드 로빈이 이루어졌다[120]. 다른 기관 소속의 연구원들이 10가지 서로 다른 방법으로 실시하였는데, 이중 하나는 공개된 소스를 이용하였다[121]. 아래에서는 라운드 로빈의 결과와 그로부터 얻은 교훈을 요약하고자 한다.

단계 1(phase one)에서, TÜV Rheinland 가 실험적으로 CSER 계산에 필요한 태양광모듈 입력 파라미터를 결정하여 다른 참가자들에게 제공하였다. 각 참가자는 다른 참가자의 결과를 모르는 가운데 CSER 을 계산한다. 이후 각 참가자들의 계산절차에서 중요한 중간결과뿐 아니라 최종 CSER 값들을 모두에게 제공한다. 각 계산 단계별로 상대적인 차이를 분석하고 논의하였다.



단계 1에서 각 기후 프로필별로 중간값에 해당하는 CSER 결과들이 그림 43의 상단에 비교되어 있다. 참가자 E1 혹은 H1은 모든 기후 프로필에서 CSER 값이 가장 높고, 반면에 I1 은 가장 값이 낮다. 그리고 참가자의 순서는 각 프로필마다 동일하지 않다. 표 13은 CSER 의 절대적 및 상대적인 차이를 보여주고 있다. 모든 단계에서 열대 습한 프로필이 두 가지 값 모두에서 가장 높은 편차를 보이는데, 단계 1에서 절대적 차이는 0.133, 표준편차는 0.039이다. 만약 이 CSER 의 차이 0.133을 해당 기후 프로필의 중간 CSER 값과 비교하여 취하면 결과는 14.7 %가 된다. 가장 잘 맞는 기후 프로필의 경우에도 동일 모듈에 대한 참가자들 사이의 CSER 값의 상대적인 6.8 %로, 이는 그림 42에 나타낸 서로 다른 모듈기술 사이의 CSER 값 차이와 비슷하다. 참가자들 사이의 에너지등급 계산 결과가 더 비슷해지기 위해서는 분명히 추가적인 조사연구가 필요하다.

중간 결과에 대한 심층 분석에서 편차의 이유로 2 가지 종류의 요인이 밝혀졌다. 하나는 괄호나 부호 누락과 같은 코딩 오류다. 다른 하나는 규격 해석에서의 차이인데, 그 중 하나는 각도 보정과 관련이 있다. IEC 61853-3 규격은 Marti 과 Ruiz[48, 111]의 각도 손실 모델(angular loss model)을 사용하는데, 이것의 단일 피팅 파라미터는 각도 손실계수 a, 이다. 이는 문헌 [4]에 정의된 바와 같이, 그 값을 입사각 수정기 측정값(IAM(0)에 피팅하여 얻는다. 그러나 수학적인 피팅 방법은 규격에 정의되어 있지 않다. 다섯 참가자는 최소자승 피팅으로 a, = 0.14571의 값을 얻었다. 반면에 다른 참가자들은 절대값 평균 편차법(mean absolute deviation approach)을 사용하여 더 높은 a, 을 얻었다. 이들 차이에 의한 영향은 CSER 값으로 약 0.002이다.

2 단계 라운드 로빈에서는 이런 피팅 차이를 제거하고 다른 단계에 중점을 두기 위해 모든 계산에서 *a*_r = 0.14571을 사용하기로 결정하였다. 그리고 결과를 좀 개선하기 위해 참가자들이 단계 1의 모든 결과들을 볼 수 있게 하였다.











그림 43: 각 단계에서 기후 프로필의 중간값에 관련되는 CSER. J1은 다른 모듈의 입력 파라미터를 사용하였기 때문에 배제되었음.



	절대적인 CSER 차이			CSER 중간값 대비 CSER 의 상대적 차이 [%]		
Climate profile	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Subtropical arid	0.117	0.014	0.013	12.9%	1.6%	1.5%
Subtropical coastal	0.098	0.016	0.016	10.2%	1.7%	1.7%
Tropical humid	0.133	0.029	0.029	14.7%	3.2%	3.2%
Temperate continental	0.084	0.019	0.017	8.6%	1.9%	1.8%
Temperate coastal	0.085	0.024	0.023	8.6%	2.5%	2.3%
High elevation	0.067	0.012	0.007	6.8%	1.2%	0.7%

표 13:3 단계별로 각 기후 프로필별 CSER 값의 절대적인 차이와 CSER 중간값과의 상대적인 차이.

2 단계의 결과들은 그림 43의 중앙에 있는데, 여기서 CSER 은 중간값에 대한 상대적인 값으로 주어져 있다. 가장 큰 변화는 y-축의 범위인데, 이는 절대적인 차이를 0.029(3.2 %)로 4 배 축소시켰기 때문이다. 차이는 크게 벗어난 4 개 - A2, C2, E2 와 H2 -의 값 때문이다. 이 4 개의 값을 배제한 나머지 6 개 참가자 사이의 가장 큰 절대적 차이는 0.0042 (0.46 %)이다.

중간 결과에 대한 추가 분석으로 스펙트럼 보정 과정에서의 차이가 4 개의 열외값(outlier)뿐 아니라 다른 6 개 참가자들 간의 차이에 가장 큰 영향을 미친 요인으로 밝혀졌다. 스펙트럼 보정 과정에서의 어려운 문제는 규격에 의해 조사량이 29 개 밴드로 제공되는 반면에, 분광응답은 5 nm 마다 측정이 되고 AM1.5G 기준 스펙트럼[41]은 파장 영역에 따라 0.5 nm, 1 nm 혹은 5 nm 마다 제공되기 때문이다. 분광 보정을 위해서는 모든 데이터를 내삽하고 수치적으로 적분해야 한다. 그러나 이를 위한 정확한 방법은 규격에 정의되어 있지 않아 해석상의 차이가 발생한다[5].

라운드 로빈 3 단계에서는 모든 계산에 *a*_r =0.14571을 사용하고 내삽과 적분에 공통 방법을 사용키로 결정하였다.

각 기후별 중간값에 대한 상대적인 CSER 결과는 그림 43의 하단(phase 3)에 있다. 참가자 H3은 계산을 개선시켜 다른 6 개 참가자들과 함께 하였고, 참가자 A3, C3, E3은 여전히 스펙트럼 보정에 큰 차이를 보이고 있다. 단계 3에서의 절대적 차이는 0.029(3.2 %)이다. 그 차이는 A3, C3, E3 3 개의 열외 데이터에 의한 것이었다. 이들 3 개의 데이터를 배제한 다른 7 개 참가자들 사이의 가장 큰 절대적 차이는 0.0037(0.38 %)이다.

결론적으로, IEC 61853-3의 실질적인 이행은 첫 비교에서 CSER 값이 0.133(14.7 %)의 차이를 나타난 바와 같이 예상한 것보다 더 복잡하다. 상호비교의 3 단계에서 CSER 차이는 0.029(3.2 %)미만이다. 나머지 3 개의 열외 데이터를 배제한 다른 7 개 참가자들 절대값 사이의 가장 큰 차이는 0.0037(0.38 %)이다.



4.3 축소형 매트릭스 측정

2.1.3절에 기술한 IEC 61853-1 성능 매트릭스는 100~1100 W/m² 의 조사강도와 15°C~75°C 의 모듈온도 범위에 있는 22 개의 측정점으로 구성되어 있다 (그림 44a). 측정점이 더 적은 축소형(reduced) 매트릭스는 모듈 성능이 IEC 60904-10[122]에 따라 선형일 때, 시험장비가 조사강도나 혹은 온도 설정에 제약이 있거나 시험 경비를 줄여야 하는 이유로 풀 매트릭스를 측정할 수 없을 경우에 적용한다.

그림 44b 에 있는, IEC 61853-1 규격에 기술된 축소형 매트릭스 측정은 모듈 성능이 IEC 60904-10에 따라 선형일 때, 풀 매트릭스 측정(그림 44a)의 대안으로만 적용한다. 이 단순화시킨 절차는 통상 25℃ 로 고정한 하나의 단일 온도에서 조사강도 의존성의 측정을 가능하게 하는데, 반면에 온도 의존성은 800~1000 W/m², 두 번째는 100~300 W/m² 사이의 2 개의 고정된 조사강도에서 측정한다.

a) IEC 61853-1 에 따른 풀 매트릭스						
조사강도	온도					조
W/m ²	15°C	25°C	50°C	75°C		W
1100		Х	Х	Х		11
1000	Х	Х	Х	Х		10
800	Х	Х	Х	Х		80
600	Х	Х	Х	Х		60
400	Х	Х	Х			40
200	Х	Х				20
100	Х	Х				10

b) IEC 61853-1 에 따른 단순화 매트릭스							
조사강도	온도						
W/m ²	15°C	25°C	50°C	75°C			
1100		Х					
1000	Х	Х	Х	Х			
800		Х					
600		Х					
400		Х					
200	Х	Х	Х	Х			
100		Х					

c) IEC 60891 에 따른 십자형 매트릭스					
조사강도	온도				3
W/m ²	T_{min}	25°C		T _{max}	W
1100		Х			11
1000	Х	Х	Х	Х	10
800		Х			80
600		Х			60
400		Х			40
200		Х			20
100		Х			10

d) IEC 61215-1 측정							
조사강도	다 안						
W/m ²	T_{min}	25°C		$\dots T_{\text{max}}$			
1100							
1000	Х	Х	Х	Х			
800			NMOT				
600							
400							
200		Х					
100							

그림 44: IEC 시험규격에 따른 모듈 성능용의 여러 가지 매트릭스 배열



온도계수는 흔히 낮은 조사강도에서는 측정하지 않고, 온도와 조사강도 의존성은 각각 25°C, 1000 W/m² 조건에서 측정한다. 축소형 매트릭스는 여기서 십자형(cross shaped) 매트릭스로 인정한다(그림 44c). 모듈 데이터시트, 데이터베이스와 PVSvst 같은 시뮬레이션 도구는 일반적으로 이런 유형의 데이터에 한정한다. 물론 이 방법을 향후에 IEC 61853 규격에 확대하는 것을 예상할 수는 있지만, 아직은 여전히 규칙의 범주에 있지 않다.

또 다른 전형적인 상황이 그림 44c 에 있는 것과 같은데, 여기서는 모듈 적격성을 위한 IEC 61215 규격에 의해 요구되는 데이터만 가능하다. 이는 온도계수 측정, STC 와 200 W/m² 에서의 측정과 NMOT 에서의 성능으로(MQT04, MQT06 및 MQT07) 구성된다.

4.3.1 기존 내삽/보정 방법의 개요

이런 축소형 매트릭스로 IEC 61853-3에 따른 에너지등급을 수행하기 위해서는 측정 포인트들의 외삽(extrapolation)이 필요한데, 이를 위한 표준 방식이 여기에 요약되어 있다. 외삽된 데이터의 정확성은 적용한 접근방식의 정확도에 크게 의존하고, 일부 경우에서는 측정 정확도보다 더 나쁠 수 있다는 점을 고려하여야 한다. 이는 낮은 조사강도 혹은 높은 온도 조건과 비선형 거동을 하는 모듈의 경우에 더욱 그러하다. 이런 경우에는 풀 출력 매트릭스의 측정이 우선시된다. 다른 방법들의 정확도와 그것이 CSER 에 미치는 영향에 대해서는 아래에서 더 상세히 논의될 것이다. 측정 오류의 전파 역시 함께 논의될 것이다.

외삽/내삽 절차를 기술하는 2 개의 주요 규격은 IEC 61853과 IEC 60891이다. 그 방법들은 대략 선형 내삽법과 단일 다이오드 모델 기반의 방법으로 구분할 수 있다. 방법 중 일부는 모듈 출력이나 성능의 해석에 한계가 있고, 다른 것은 풀 I-V 곡선의 해석에 기반하고 있다. 표 14는 에너지등급 매트릭스의 외삽에 사용될 수 있는 방법들만의 목록이다. 규격에 기술된 4 개의 접근방식은 적용 가능성(검증의 범위)과 입력데이터 요구사항(측정 데이터의 분포)에서 다르다.

첫 번째 방법은 4.1.4 절에서 소개한 IEC 61853-3 규격에 따른 독창적인 선형 내삽법이다. 출력 산출량은 측정된 매트릭스 상의 포인트들 사이의 성능비의 이중선형 내삽법에 의해 모델링된 것이다. 이 방법은 외삽의 경우에서는 정확도가 떨어지는데, 특히 c 와 d 같은 축소형 매트릭스에 적용할 때인데, 이때는 멀리 떨어진(far) 외삽이 요구된다.

두 번째 방법은 IEC 60891에서의 보정 절차 3에 해당한다. 이 방법은 일반적으로 축소형 매트릭스 내에서 선택한 3 개의 I-V 곡선 사이의 내삽에 사용된다. 이는 보정 파라미터를 입력으로 요구하지 않는다. 이 방법은 2 개의 I-V 곡선에서도 적용될 수 있는데, 온도와 조사강도 보정이 어디에 적용될 수 있는지 그 한계를 결정한다. 극단적으로 최소 4 개의 I-V 측정 곡선이 있으면 풀 매트릭스가 결정될 수 있다.

표 14: IEC 규격 내에서 에너지등급 목적의 출력 매트릭스의 내삽/외삽용으로 제시된 보정 방법.

보정 절차	파라미터 보정	IEC61853-3에 따른 출력 매트릭스 외삽법에 필요한 최소 입력값	참고



1	성능비의 이중선형 내삽	없음	-	IEC 61853-1에 따른 풀 출력 매트릭스 측정	<i>IEC 61853-3</i> <i>standard</i> <i>procedure</i>
2	I-V 곡선에 적용된 선형 내삽	없음	-	내삽해야 할 극단의 값에서는 2~4I-V 곡선	IEC 60891 ed.03 correction procedure 3
3	평균 온도계수를 가지고 P _{max} 의 온도 보정	Yhigh, Ylow	-	높고, 낮은 조사강도에서 온도계수의 측정 고정된 온도에서 100~1100 W/m² 범위에서 측정된 조사강도 의존성	IEC 61853-1 simplified procedure
4	반경험적인 다이오드 모델에 기반한 I-V 곡선 보정	$\alpha_{rel}, \beta_{rel,}$ k', R's, B1 and B2	-	1000 W/m², 적어도 30℃ 범위에 걸쳐 최소 4 개의 I-V 곡선 측정 25℃, 100~1100 W/m² 의 범위에서 최소 4 개의 I-V 곡선 측정	<i>IEC 60891</i> <i>ed.03</i> <i>correction</i> <i>procedure 2</i>

선형 내삽법 모두는 최대 출력점이 측정 노이즈와 I-V 곡선의 선택에 민감하기 때문에 불연속 상황으로 이어질 수 있다. 가능한 입력 매트릭스의 유형에 따라 I-V 곡선의 조합을 다르게 할 수도 있다. IEC 61853 풀 성능 매트릭스에 의해 제공되는 측정으로부터 가능한 I-V 곡선의 조합은 1,000개 이상이다(case a).

IEC 61853-1에 따른 단순화 매트릭스 측정으로부터 풀 매트릭스를 외삽하기 위해 case b 에서 적용된 세 번째 방법은 2 개의 조사강도 수준으로부터 결정한 상대 온도계수의 편차가 개방전압에서는 10 % 이하이고, 최대 출력에서는 15 % 이하일 때는 두 온도계수의 평균을 사용하여 매트릭스에서 빠진 포인트들을 채우는데 사용할 수 있다. 이는 선형 모듈에만 적용되는 매우 독특한 케이스이다.

마지막 방법인 IEC 60891 절차 2는 단순화한 단일 다이오드 모델에 기반을 둔 것으로 개방전압의 비선형성과 직렬저항의 온도 의존성을 고려하기 위해 Monokroussos 등에 의해 개선된 것이다[123]. 개선된 모델은 규격의 edition 3에서 실행되었다[124]. 보정된 절차의 최종 버전은 다음 두 방정식으로 기술된다.

$$I_{2} = \frac{G_{2}}{G_{1}} \cdot I_{1} \cdot \frac{\left(1 + \alpha_{rel} \cdot (T_{2} - 25^{\circ}\text{C})\right)}{\left(1 + \alpha_{rel} \cdot (T_{1} - 25^{\circ}\text{C})\right)}$$
(16)

$$V_{2} = V_{1} + V_{oc,stc} \cdot \left| \beta_{rel} \cdot \left(f(G_{2}) \cdot (T_{2} - 25^{\circ}\text{C}) - f(G_{1}) \cdot (T_{1} - 25^{\circ}\text{C}) \right) + \frac{1}{f(G_{2})} - \frac{1}{f(G_{1})} \right| - R'_{s1} \cdot (I_{2} - I_{1}) - k' \cdot I_{2} \cdot (T_{2} - T_{1})$$
(17)

 $O[7] \mathcal{M}, \ f(G) = \frac{V_{oc,stc}}{V_{oc}(G)} = 1 + B_1 \cdot ln \ \left(\frac{1000Wm^{-2}}{G}\right) + B_2 \cdot ln^2 \left(\frac{1000Wm^{-2}}{G}\right)$

85



 $R'_{s1} = R'_s + k' \cdot (T_1 - 25^{\circ}\text{C}).$

I₁, V₁ 측정된 I-V 곡선의 전류와 전압;

I₂, V₂ 목표 I-V 곡선의 전류와 전압;

G₁ 측정된 조사강도;

G₂ 목표 조사강도;

T₁ 시험 대상 소자(DUT)의 측정된 온도;

 T2
 DUT 의 목표 온도;

V_{oc,stc} STC 에서의 개방전압;

V_{oc1} 측정된 개방전압;

 α_{rel}, β_{rel}
 1000 W/m² 에서 측정된 시험 소자의 상대적 단락전류와 개방전압의

 온도계수

- B1 개방전압에 대한 조사강도 보정 인자
- B2
 조사강도에 따른 개방전압 Voc의 비선형성을 고려한 개방전압에 대한 조사강도 보정 인자;
- R's 시험소자의 내부 직렬저항;
- R'_{s1} 온도 T1 에서의 내부 직렬저항;
- k' 내부 직렬저항 R'_s의 온도계수

반경험적인 변환 방정식 (16)과 (17)에는 6 개의 보정 파라미터가 들어있다. 단락전류(α_{rel})와 개방전압(β_{rel})에 대한 상대적인 온도계수 외에 온도에 따른 직렬저항(그리고 충진율)의 변화를 설명하는 추가적인 온도계수(κ')가 필요하다. 두 개의 파라미터 B₁과 B₂는 조사강도 의존성을 기술하고 개방전압을 보정한다. B₁은 p-n 접합의 다이오드 열 전압 D 와 시료 소자에서 직렬로 연결된 셀의 개수 n_s 와 관련되고, 반면에 B₂는 낮은 조사강도에서 일어날 수 있는 V_{oc}의 비선형성을 고려한 것이다. 선형의 경우에는 B₂를 "0"으로 설정한다. 보정 파라미터들은 일련의 측정된 I-V 곡선들로부터 결정하여야 한다. 일부 시험기관들은 보정 파라미터를 시험보고서에서의 산출물로 이미 추가하고 있다. 이 보정 방법은 넓은 범위의 조사강도에 걸쳐 사용할 수 있다는 장점이 있다. 아래 사례에서 볼 수 있는 것처럼 십자형 매트릭스를 외삽하기 위한

가장 적절한 방법이다.

규격에 기술된 이 4 가지 방법외에 측정된 성능 매트릭스를 다른 포괄적인 모델로도 피팅할 수 있다. 내삽법과는 달리 피팅된 모델이 측정된 모든 데이터 포인트들을 반드시 통과할 필요는 없다. 무작위의 노이즈에 큰 영향을 받지 않는 장점이 있지만, 선택된 모델이 실제 모듈의 거동과 잘 매칭될 때에만 유효하다는 단점이 있다. 이는 이들 방법이 일부 유형의 모듈에는 맞지 않을 가능성을 내보이는 것이다. 에너지등급에 사용된 사례의 하나는 "기계론적 성능 모델(Mechanistic Performance Model: MPM)"이다[125].



4.3.2 내삽/교정 방법이 에너지등급의 정확성에 미치는 영향

Blakeslev 등은 다양한 내삽법과 여러가지 축소형 측정 세트의 선택을 사용하여 에너지등급의 정확성에 미치는 측정 오류의 영향을 연구하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션 방식을 사용하였다[107]. 보다 상세한 내용은 아래에서 제공되나 일반적 결론은 다음과 같다.

- 에너지등급의 정확성은 실제적인 실험실 장비에서의 측정 오류에 의해 지배된다. 불가피한 측정 불확도와 관련하여 내삽법/보정 절차의 선택은 그 영향이 미미할 뿐이다.
- 측정 오류의 영향을 고려해 볼 때, 성능 매트릭스에서 측정한 데이터 포인트의 개수는 이들 포인트들이 잘 선택된다면 에너지등급의 정확성에 큰 영향 없이 크게 축소할 수 있다. 좋은 결과를 얻기 위해서는 최소 6개 데이터 포인트가 필요하다.

해당 결론은 다만 모듈의 에너지등급에만 적용된다는 것을 주목해야 한다. 내삽법의 선택과 축소된 매트릭스의 사용은 순간적인 출력 산출량을 정확하게 모델링하는 능력에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다(그림 45 참조).

해당 접근방식의 이득은 서로 다른 유형의 모듈을 포함하여 모듈의 개수가 아주 많은(1,000 모듈) 경우에도 시뮬레이션이 가능하다는 것이다. 반복적으로 측정 오차를 추출함으로써 측정 오차의 통계적 분석이 가능하다. 표 14(이중선형 내삽, 단순화 방법 그리고 I-V 곡선의 선형 내삽)에 있는 첫 3 가지 방법과 Ransome 과 Sutterlüti 의 기계론적 성능 모델(MPM)을 포함하는 이 접근법을 사용하여 4개의 다른 내삽방식을 조사하였다[125].



그림 45: 여러가지 내삽법과 축소형 성능 매트릭스 배열형태의 정확성을 평가하기 위해 사용된 컴퓨터를 이용한 방법의 개략도(Source: Adapted from [107]).



그림 46은 실제적 오류를 가지고 측정된 단일 CIGS-like 모듈의 경우에 이들 내삽 함수들의 산출 사례들을 보여준다. 그림은 측정된 성능 매트릭스 바깥의 조건에 외삽합으로써 측정 오류가 어떻게 증폭되는지를 보여준다. 그러나 에너지등급의 목적을 위해서라면 해당 오류들은 만 일년 동안의 데이터를 효과적으로 평균한 것이라 무작위 오류들의 영향을 크게 줄여준다.



그림 46: 단일 CIGS-like 모듈의 시뮬레이션용의 서로 다른 내삽법에 대한 노이즈 영향의 사례. 파선은 측정 오류가 없을 때, 모듈의 "참(true)" 거동을 보여준다. 점들은 시뮬레이션한 측정 오류를 가지고 IEC 61853-1에 따른 성능 매트릭스 측정 사례를 보여준다. 굵은 선은 시뮬레이션한 측정을 입력으로 사용하여 내삽을 했을 때의 산출을 보여준다.

성능 매트릭스의 측정과 내삽법 선택에서의 무작위하고도 체계적인 오류들은 61853-3의 에너지등급 모델에 따른 연간 에너지수율 계산의 정확도에 영향을 미친다. 그림 47은 에너지수율 계산의 정확성이 어떻게 이 선택에 의존하는지를 보여준다. 에러바(error bars)는 내삽이 완전하고 측정 오류가 없을 때 얻을 수 있는 "참(true)" 값에 대비하여



가능성이 높은 값들의 범위를 나타낸다. 그 결과 전체 불확도 측면에서는 이중선형 내삽법의 선택 혹은 경험적 모델 선택 사이의 차이가 거의 없음을 보여준다. 반면에, I-V 곡선 내삽 모델은 c-Si 모듈에서는 잘 맞는데, CdTe 모듈에는 잘 맞지 않는다. 그 이유로는 단일 다이오드 모델로 잘 설명이 되지 않는 모듈에서는 I-V 곡선 모델의 거동이 제대로 작동하지 않기 때문이다. 축소된 측정 세트를 사용하는 IEC 61853-1의 단순화 방법은 선형 c-Si 모듈의 경우에는 풀 매트릭스 측정만큼이나 잘 이행되나 약간 비선형인 CdTe 모듈에 적용할 때는 에너지등급에 약간의 바이어스가 있게 된다. 이러한 결과는 풀 성능 매트릭스에 무작위 측정 오류의 영향을 억제할 수 있는 충분한 여분이 있음을 시사한다.



그림 47: 시뮬레이션한 모듈과 측정 오류를 사용하여 풀 성능 매트릭스을 측정할 때 모든 요인들에 의해 발생하는 에너지등급에서의 오류에 대한 통계적 분석. 부호들은 에너지등급에서의 평균 바이어스를 보여주고, 오류바는 하나의 표준편차를 의미한다. IEC 61853-4에 들어 있는 6개 기준기후 각각에 대해 서로 다른 색깔을 사용한다. 4개의 내삽법들을 비교하였다. 각 유형의 1,000개 모듈들을 시뮬레이션하였다. 좌: 단결정 실리콘 모듈. 우: CdTe 모듈.

4.3.3 IEC 60891 절차 2를 사용한 십자형 매트릭스 외삽의 사례

아래에서는 십자형 매트릭스를 풀 에너지등급 매트릭스로 외삽하는데 IEC 60891 보정 절차 2(표 14의 방법 4 참조)를 어떻게 적용할 수 있는지를 소개하고자 한다. 그림 48b)는 60개의 PERC 셀로 구성된 상업용 태양광모듈의 측정된 출력 매트릭스의 사례를 보여주고 있다. 그림 48a)에 나타낸 열 개의 I-V 곡선은 매트릭스에서 강조 표시가 된 값들에 해당한다. 이들을 STC로 변환하면 6개의 보정 파라미터 - α_{rel}, β_{rel}, k', B₁, B₂, R_s' – 가 결정된다. 그림 48c)와 d)는 변환된 I-V 곡선과 각각 반복적으로 결정된 파라미터를 가지고 확보한 편차를 보여준다. 보정된 파라미터는 전체 조사강도와 온도 범위에 걸쳐 P_{max} 에서의 편차가 최대 ±0.5 %로 IEC 60891 요구조건을 만족시킨다.





그림 48: a) 와 b): 상업용 PERC 태양광모듈의 보정 파라미터 결정을 위해 사용한 십자형 매트릭스에 해당하는 10 개의 I-V 측정 곡선과 출력 매트릭스 값(단위 W)들의 사례. c) 와 d): 10 개의 I-V 곡선과 출력에서의 상대적 편차를 변환하여 얻은 보정 파라미터 (α_{rel}=0.0004; β_{rel}=-0.003; k'=0.0022; B₁=0.0435; B₂=0.0018; R_s=0.19).

그림 49는 풀 에너지등급 매트릭스를 결정하기 위해 동일한 보정 파라미터를 적용할 때 어떻게 오류가 전파되는지 보여준다. 그림 48b)는 측정된 출력값 대비 계산된 출력값의 편차를 분석한 것이다. 풀 매트릭스는 온도 보정(수평 변환)이나 혹은 조사강도 보정(수직 변환)으로 얻을 수 있다. 그림 49a)와 b)는 두 접근방식 각각의 편차를 보여준다.



a)

G/T	15	2	25	50	75
1100				-0.07%	-0.17%
1000					
800	-0.11%			0.13%	0.38%
600	-0.29%			0.34%	0.89%
400	-0.22%			0.64%	
200	-0.24%		7		
100	1.78%				

G/T	15	25	50	75
1100			-0.06%	-0.03%
1000	ł			•
800	-0.13%		0.23%	0.66%
600	-0.28%		0.51%	1.29%
400	-0.21%		0.81%	
200	-0.30%			
100	0.80%			

그림 49: 측정된 출력 대비 변환된 출력의 상대적인 편차로 a)는 순수 수직변환(조사강도 보정), b)는 순수 수평변환(온도 보정).

b)

수직변환의 경우 오류가 1.8 %에 달하는 100 W/m² 에서의 출력값을 제외하고 전체 매트릭스에 걸쳐 오류는 0.9 % 훨씬 이하이다. 그러나 편차는 조사강도 수준과 측정이 수행된 시험기관에 따라 최대출력의 전형적인 측정 불확도인 1~4 % 범위보다 상당히 아래에 위치한다[107, 126, 127]. 그림 49b)는 수평변환의 결과를 보여준다. 예상한 바와 같이 온도 보정 파라미터는 온도계수가 측정되는 조건인 조사강도의 약 ±30 %의 제한된 범위에서 적용할 수 있기 때문에 800 W/m² 이하에서의 편차는 증가한다. 더 넓은 온도범위에서의 변환은 25℃ 에서 15℃ 로의 변환보다 더 영향을 받는다. 마지막의 경우, 오류는 모든 조사강도에서 0.9 % 이하에 머문다. 그래서 수직변환의 대안으로 매우 낮은 조사강도에서는 수평변환이 적용될 수 있다.

아래에서는 수직/수평변환 조합이 어떻게 다양한 결정질실리콘 태양전지기술(poly, mono, PERC, PERT, HJT)과 모듈 특성분석에 적용되는지 보여준다. 2.4 장에 기술된 CFV Labs 에서 측정된 9개의 결정질실리콘 모듈 매트릭스를 동일한 절차로 처리하였다.



모델	기술	α_{rel}	β_{rel}	B ₁	B ₂	R _s ′	k'
JKM260P-60	Multi-c-Si	0.038%	-0.338%	0.0439	0.0026	0.165	0.0013
CS6K-270P	Multi-c-Si	0.039%	-0.332%	0.0415	0.0022	0.154	0.0012
Q.PLUS BFR	Multi-Si PERC	0.038%	-0.315%	0.0411	0.0022	0.210	0.0012
CS6K-275M	Mono-Si	0.035%	-0.334%	0.0419	0.0022	0.160	0.0013
Q.PEAK-G4.1 300	Mono-Si PERC	0.033%	-0.319%	0.0382	0.0018	0.278	0.0011
MSE300SQ5T	Mono-Si PERC	0.033%	-0.323%	0.0379	0.0017	0.198	0.0009
IT-360-SE72	Mono-Si PERC	0.036%	-0.311%	0.0406	0.0020	0.240	0.0015
LG320N1K-A5	N-type Mono-Si	0.030%	-0.318%	0.03828	0.0017	0.220	0.0010
VBHN325SA	HJT	0.025%	-0.229%	0.04217	0.0022	0.430	0.0040

표 15: 2.4 장에 기술한 Sandia 모듈의 IEC 60891 계수.

표 15는 조사된 9 개의 모듈의 사양서를 요약한 것으로 IEC 60891에 따라 결정된 I-V 보정 파라미터도 함께 정리되어 있다. 이 분석에 필요한 I-V 곡선은 출력 매트릭스와 함께 가용한 PAN files 로 생성하였다.

조사강도 보정(고정된 온도에서 수직변환)을 모든 값들에 적용하였는데, 보정 파라미터의 결정이 0.5 %를 초과하는 MOD1, MOD2, MOD3, MOD5, MOD6, MOD8, MOD9 모듈의 15℃ 에서 낮은 조사강도 값들은 예외이다. 이 경우, 온도 보정은 100 W/m² 와 25℃ 에서 측정한 I-V 곡선에 대신 적용한다. 그림 50은 9 개 모든 모듈에 대해 측정값 대비 외삽한 값들의 편차를 보여준다. 반면에 그림 51은 모든 모듈의 평균 바이어스 오차와 표준 편차 오차를 보여준다.

가장 큰 오차는 0.64 %이다. 표준편차는 조사강도가 낮을수록 증가하여 0.54 %까지 이른다. 결과들은 Blakesley 등의 관찰과 잘 부합한다[107].



MOD1	JKM260P-60 260 W						
G/T	15	25	50	75			
1100		0.19%	0.20%	0.20%			
1000	-0.01%	0.00%	0.13%	0.45%			
800	-0.31%	-0.32%	-0.32%	-0.32%			
600	-0.49%	-0.49%	-0.49%	-0.47%			
400	-0.45%	-0.45%	-0.42%				
200	0.19%	0.21%					
100	-0.41%	2.11%					

MOD2	CS6K-270P 270W			
G/T	15	25	50	75
1100		0.18%	0.19%	0.20%
1000	0.03%	0.00%	0.03%	0.26%
800	-0.27%	-0.28%	-0.30%	-0.31%
600	-0.40%	-0.42%	-0.45%	-0.46%
400	-0.36%	-0.37%	-0.39%	
200	0.17%	0.16%		
100	-0.34%	1.93%		

MOD3	Q.Plus BFF		3 Q.Plus BFR-G4.1 280W		W
G/T	15	25	50	75	
1100		0.13%	0.13%	0.14%	
1000	0.02%	0.00%	0.04%	0.24%	
800	-0.18%	-0.18%	-0.19%	-0.18%	
600	-0.22%	-0.22%	-0.22%	-0.18%	
400	-0.11%	-0.10%	-0.06%		
200	0.43%	0.46%			
100	-0.38%	2.18%			

MOD4	CS6K-275M 275W				
G/T	15	25	50	75	
1100		0.11%	0.10%	0.07%	
1000	0.02%	0.00%	0.03%	0.21%	
800	-0.21%	-0.19%	-0.15%	-0.09%	
600	-0.36%	-0.33%	-0.22%	-0.08%	
400	-0.46%	-0.39%	-0.18%		
200	-0.39%	-0.25%			
100	0.20%	0.40%			

MOD5	Q.	Peak BLK	G4.1 300	W
G/T	15	25	50	75
1100		0.12%	0.12%	0.11%
1000	0.06%	0.00%	0.00%	0.27%
800	-0.20%	-0.19%	-0.18%	-0.15%
600	-0.34%	-0.32%	-0.27%	-0.20%
400	-0.40%	-0.36%	-0.25%	
200	-0.28%	-0.20%		
100	-0.40%	0.62%		

MOD6	MSE300SQ5T			
G/T	15	25	50	75
1100		0.10%	0.11%	0.12%
1000	0.05%	0.00%	0.05%	0.41%
800	-0.13%	-0.13%	-0.14%	-0.15%
600	-0.15%	-0.16%	-0.17%	-0.17%
400	-0.13%	-0.13%	-0.11%	
200	0.11%	0.13%		
100	-0.28%	1.38%		

MOD7	IT-360-SE72				
G/T	15	25	50	75	
1100		0.08%	0.06%	0.03%	
1000	0.03%	0.00%	0.04%	0.27%	
800	-0.13%	-0.12%	-0.07%	-0.01%	
600	-0.23%	-0.19%	-0.08%	0.07%	
400	-0.30%	-0.23%	-0.01%		
200	-0.31%	-0.16%			
100	0.15%	0.37%			

_						
	MOD8	LG320N1K-A5 320W				
5	G/T	15	25	50	75	
,	1100		0.08%	0.07%	0.06%	
	1000	0.04%	0.00%	0.03%	0.33%	
,	800	-0.12%	-0.11%	-0.09%	-0.05%	
,	600	-0.18%	-0.16%	-0.10%	0.00%	
_	400	-0.25%	-0.20%	-0.05%		
-	200	-0.23%	-0.13%			
_	100	-0.42%	0.54%			

MOD9		N325SA16 325W				
G/T		15	25	50	75	
110	0		0.11%	0.09%	0.06%	
100	0	0.00%	0.00%	0.03%	0.11%	
80	0	-0.20%	-0.18%	-0.12%	-0.05%	
60	0	-0.33%	-0.29%	-0.15%	0.02%	
40	0	-0.44%	-0.35%	-0.08%		
20	0	-0.42%	-0.24%			
10	0	0.22%	0.48%			

그림 50:9 개의 상업용 모듈에 대해 측정한 출력 대비 변환한 출력의 상대적인 편차.

	Mean bias error				
G/T	15	25	50	75	
1100		0.10%	0.04%	-0.04%	
1000	0.03%	0.00%	0.05%	0.29%	
800	-0.17%	-0.14%	-0.03%	0.11%	
600	-0.26%	-0.19%	0.01%	0.27%	
400	-0.25%	-0.16%	0.11%		
200	-0.10%	0.12%			
100	-0.04%	1.20%			

	Standard Deviation					
G/T	15	25	50	75		
1100		0.05%	0.07%	0.12%		
1000	0.05%	0.00%	0.07%	0.13%		
800	0.08%	0.07%	0.12%	0.21%		
600	0.15%	0.12%	0.21%	0.40%		
400	0.31%	0.23%	0.28%			
200	0.54%	0.67%				
100	0.31%	1.70%				

그림 51: 9 개 상업용 모듈의 평균 바이어스 오류와 에너지등급 출력 매트릭스값의 표준편차.

4.3.4 축소형 에너지등급 측정의 정확도와 비용

인정받은 시험기관들에 대해 Blakesley 등이 수행한 설문조사 결과를 토대로[107], 풀 성능 매트릭스가 사용되었을 때 불확도의 전형적인 요인의 명세뿐 아니라, 그림 52에

93



재현한 것과 같이 에너지등급내 각 구성요소의 상대적인 비용을 나타내는 그림을 만들수도 있다. 성능 매트릭스 측정에서의 무작위 오류가 억제되고, 최종 불확도는 기준 셀의 교정과 같은 체계적인 오류에 의해 지배된다는 것을 분석을 통해 확인하게 되었다. 이들 결과들은, 일련의 축소된 측정을 통한 에너지등급 추정이 유사한 정확도의 결과를 제공할 수 있으면서도 풀 매트릭스 측정에 비해 비용은 줄어든다는 것을 나타낸다.



그림 52: IEC 61853-1&2에 따른 일련의 종합적인 에너지등급 측정을 수행하는 비용에 있어서의 상대적인 비중. *공칭 모듈 작동온도 (NMOT) 파라미터의 비용은 포함되지 않았다(Source: [107]).

이를 입증하기 위해, 선형 내삽과 측정 포인트들로부터의 내삽 및 외삽 적용 경험적 모델 모두를 사용하여 1,000 개 이상의 축소형 측정 매트릭스 시나리오 대해 정확도와 비용을 평가하였다. 그림 53에 나타낸 해당 결과는, 에너지등급의 평가에서 정확도의 큰 손실 없이 성능 매트릭스에서 측정 포인트의 개수를 줄일 수 있다는 것을 보여준다. 다만 측정 포인트들이 잘 선택되었다는 전제하에서이다. 이 정도 수준으로 포인트의 개수를 줄이면 성능 매트릭스 측정비용을 약 절반으로 할 수 있다. 기술 유형에 따른 바이어스 역시 측정 포인트들의 개수와 선택에 의해 크게 영향을 받는데, 그 이유는 일부 조합은 비선형 거동을 억류하는데 유리하기 때문이다. 2 개의 서로 다른 내삽법을 비교하면, 일반적인 거동은 매우 유사하다. 경험적 모델링 방식은 측정 포인트의 선택에 문제가 있어도 잘 견디지만, 측정 포인트의 선택이 잘 되었을 때에도 역시 기술 바이어스에 더 취약하다.





그림 53: IEC 61853-1 규격이 요구하는 것에 비해 측정 포인트의 개수를 축소한 성능 매트릭스를 사용하여 에너지등급을 계산함에 있어서의 정확도((95% 신뢰 구간에서 *E_{mod,year}* 값으로 표시). 좌: 측정 포인트들 사이에 선형 내삽을 사용. 우: 측정 포인트에 피팅한 경험적 모델을 사용. 결과는 에너지등급의 상대적인 총 비용에 대해 그린것으로, 각도와 분광응답 측정 비용을 포함한다. 컬러는 모듈 유형 사이의 바이어스 규모를 나타낸다. 계산은, 시험과 측정 기관의 조사로부터 나온 불확도와 비용 모델을 사용하여 1,000 개의 무작위로 생성된 다양한 기술 유형을 시뮬레이션한 모듈 집단을 토대로 한 것이다(Source: [107]).

이들 측정 시나리오 중 가장 잘 된 것이 그림 54에 있다. 주어진 포인트 개수에 대해 유사한 결과를 산출하는 많은 수의 대체 전략이 있다. 일반적인 규칙으로, 낮은 것과 중간 조사강도를 포함하는 낮은 온도(예: 15°C)에서 일련의 측정을, 그리고 중간과 높은 조사강도를 포함하는 높은 온도(50°C 혹은 75°C)에서 또 다른 일련의 측정을 이행하는 것이 필요하다. 6 개 이상의 측정 포인트가 있으면 관련되는 비선형 거동의 대부분은 구분해낼 수 있다.

8개의 측정 포인트					
조사강도	온도				
W/m ²	15°C	25°C	50°C	75°C	
1100					
1000	Х		Х		
800	Х		Х		
600					
400	Х		Х		
200	Х				
100	Х				

7개의 측정 포인트					
조사강도	온도				
W/m ²	15°C	25°C	50°C	75°C	
1100					
1000	Х		Х		
800	Х		Х		
600	Х		Х		
400					
200	Х				
100					



6개의 측정 포인트						
조사강도	온도					
W/m ²	15°C	25°C	50°C	75°C		
1100			Х			
1000	Х		Х			
800	Х		Х			
600						
400						
200	Х					
100						

5개의 측정 포인트						
조사강도	온도					
W/m ²	15°C	25°C	50°C	75°C		
1100				Х		
1000						
800	Х			Х		
600						
400	Х					
200	Х					
100						

그림 54: 그림 53에 나타낸 모든 시나리오 중 가장 좋은 측정 시나리오의 사례 (에너지등급 오류에 대해 가장 낮은 95 % 신뢰구간을 가진 시나리오). X 표는 측정이 이루어진 조건을 나타내고, 회색 박스는 측정이 이루어지지 않았음을 나타낸다. 여기서는 측정 포인트가 8, 7, 6, 그리고 5 개인 경우의 최선의 시나리오를 보여준다.

4.1 장에서 설명한 바와 같이, 성능 매트릭스 외에 에너지등급 역시 IEC 61853-2에 따른 분광응답, 입사각 응답과 공칭 모듈 작동온도(NMOT) 파라미터를 필요로 하는데, 이들은 총 비용에 상당한 부분을 차지한다. 규격에서는, 입사각 측정을 유사 모듈 사이에 공유하도록 허용하여 반복 측정을 피하게 한다. 이런 영향들이 그림 54에 고려되어 있는데, 여기서 입사각 측정을 배제함으로써 정확도에서의 큰 손실 없이 비용을 30 % 이상 감소시킬 수 있음이 확인되었다. 마찬가지로, 분광응답 측정에서의 데이터 포인트 개수를 줄임으로써 정확도의 큰 손실 없이 에너지등급 총 비용의 5 %를 줄일 수 있다는 것이 확인되었다. 이런 비용 절감은 성능 매트릭스를 6 개 포인트로 줄이는 것과 조합시킬 수 있는데, 이렇게 하면 총 비용의 약 1/3로 에너지등급의 정확한 추정을 제공할 수 있게 된다.



4.4 태양광시스템 에너지 예측에 샌디아 모델의 교정과 적용

4.4.1 서론

2.3 장에서 논의한 바와 같이, 옥내 특성분석용 규격 IEC 61853을 토대로 잘 정리된 독립된 포인트들보다는 옥외측정이 연속적인 작동조건을 더 잘 포괄할 수 있다. 조사강도와 온도 외에 이들 측정들은 태양광 성능에 영향을 미치는 다른 변수들, 주로 스펙트럼, 입사각과 풍속 등의 범위도 역시 잘 커버한다. 그래서 옥외측정은 통상적으로 시험 대상 기술용의 적절한 성능 모델과 적어도 61853-1 매트릭스가 재현될 수 있는 것과 같은 변환 방정식과 짝을 이룬다.

샌디아 어레이 성능모델(Sandia Array Performance Model: SAPM)[45]은 4 개 방정식으로 구성된 하나의 반경험적인 세트로, 적절히 교정된다면 옥외 데이터를 한 세트의 계수로 줄일 수 있는데, 이는 a) STC 에서 모듈 성능을 대표하고, b) 옥외 데이터를 IEC 61853-1 성능 매트릭스로 변환하는데 사용될 수 있고 c) 임의의 조건 하에서 에너지 예측이나 혹은 에너지등급의 수행을 위해 표(테이블) 형식의 기상 데이터와 결합시킬 수 있다. 4 개의 주된 방정식은 분광응답, 태양전지 온도와 반사손실을 기술하는 서브모델을 통해 보완이 된다. 경사도를 고정시킨 조건에서의 데이터를 사용하여 모델을 교정하기 위한 노력이 지속되는 동안[128], 가장 완전하고 신뢰할 만한 방법이 2-축 솔라트랙커의 데이터를 계속 이용하는 것이다[129]. 2-축 솔라트랙커의 사용은 측정된 성능 데이터를 법선 입사 혹은 "조사시(on-sun)" 조건과 입사각 혹은 "차광시(off-sun)" 조건으로 분리시키는 것을 용이하게 한다. 이는 결과적으로, 축에서 벗어난 반사손실과 연계 동반하는 입사각 응답과는 분리된 최초의 환경 변수의 함수로 모듈 성능의 평가를 용이하게 한다.

2-축 솔라트랙커에서의 옥외 모듈 특성분석 절차는 2.3.1 절에 요약되어 있다[44]. 여기에서는 옥외 모듈 특성분석으로부터 SAPM 을 교정하는 분석절차를 기술하고자 한다. 절차는, 옥외시험으로부터 대부분의 데이터를 형성하는 법선 입사 조사시 특성분석과 차광 혹은 입사각 시험으로 나누어진다. 선택항목인 조사시 열적시험 분석 역시 소개할 것이다. 독립적인 조사시 열적시험이 누락되면 조사시 전기적 성능데이터로부터 온도계수를 추출하여야 한다. 데이터의 축소에 대한 상세 내용은 너무 길어 문헌을 참고하고자 한다[44].

4.4.2 샌디아 어레이 성능모델 개요

샌디아 어레이 성능모델(SAPM)은 단락전류, 개방전압, MPP 에서의 전류와 전압을 기술하는 4 개의 기본적인 방정식으로 구성되어 있다. 이 중에서 단락전류 방정식이 모델의 핵심인데, 이는 다른 모든 방정식에서 사용하는 유효 조사강도(Ee)를 계산하는데 사용되기 때문이다. 모델은, 그림 55에서와 같이 I-V 곡선을 따라 I_x 와 I_{xx} 같은 중간 포인트들도 포함한다. 해당 포인트들은 원래 태양광모듈이 최대출력점을 벗어나는 축전지 기반 시스템의 모델링을 지원하기 위해 포함되었던 것이다. 실제로 이들 포인트들은 드물게 사용되어 여기서는 언급하지 않는다.





그림 55: 샌디아 어레이 성능모델에서 기술한 I-V 곡선 상의 모델 포인트들 (reproduced from [45]).

A. 기본적인 방정식

단락전류 I_{sc} 의 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$I_{sc} = I_{sco}f_1(AM) \left[\frac{G_{poa}}{G_0}\right] \left[1 + \hat{\alpha}_{Isc}[T_c - T_0]\right]$$
(18)

여기서 *f₁(AM)* 은 에어매스의 영향을 광생성 전류에 연계시킨, 차원이 없는 다항 함수이다.

$$f_1(AM) = a_0 + a_1(AM) + a_2(AM)^2 + a_3(AM)^3 + a_4(AM)^4$$
(19)

나머지 모든 계산에 사용된 유효 조사강도는 다음과 같이 주어진다.

$$E_{e} = \frac{I_{sc}}{I_{sco} [1 + \hat{\alpha}_{Isc} [T_{c} - T_{0}]]}$$
(20)

나머지 기본적인 방정식은 다음과 같다.

$$V_{oc} = V_{oco} + N_s \delta(T_c) \ln(E_e) + \beta_{Voc} [T_c - T_0]$$

$$I_{mp} = I_{mpo} [C_0 E_e + C_1 E_e^2] \left[1 + \hat{\alpha}_{Imp} [T_c - T_0] \right]$$
(21)

 $V_{mp} = V_{mpo} + C_2 N_s \delta(T_c) \ln(E_e) + C_3 N_s [\delta(T_c) \ln(E_e)]^2 + \beta_{Vmp} [T_c - T_0]$ 여기서 태양전지 셀 당의 열 전압 d(T_c) 는 다음과 같이 주어진다.



$$\delta(T_c) = \frac{nk[T_c + 273.15]}{q}$$
(22)

끝으로, 셀 온도 T_c 는 거의 알려지지 않는 반면에, 모듈 온도 T_m 은 옥외 특성분석 중에 직접 측정된다. 모듈 온도로부터 셀 온도를 계산하기 위해 간단한 일차원 열전도 모델이 사용되었다.

$$T_c = T_m + \frac{G_{POA}}{G_0} \Delta T \tag{23}$$

여기서 ΔT 는 셀과 조사강도 1000 W/m² (통상적으로 3℃ 로 가정) 하에서 측정한 모듈 후면 온도와의 차이이다.

B. 열적 모델

모듈 온도는 풍속 방정식을 통해 주위온도, T_a에 연계될 수 있다.

$$T_m = T_a + G_{POA} e^{a+bW} \tag{24}$$

C. 입사각

작동 중 햇빛이 가려진(off-axis) 동안의 반사손실은 입사각 함수로 나타낸다. 방정식 (1)에서 G_{poa} 는 직달과 확산 성분으로 나누어지는데, 여기서 직달 성분 G_b 는 $f_2(q)$ 를 통한 반사손실에 의해 영향을 받는다. 확산 이용율 항목 f_d 는 통상적으로 통일되는 것으로 처리한다.

$$G_{poa} = G_b f_2(\theta) + f_d G_{diff} \tag{25}$$

고전적인 SAPM 의 공식 표시에서는 입사각이 경험적인 5차 방정식에 의해 대표된다.

$$f_2(\theta) = b_0 + b_1(\theta) + b_2(\theta)^2 + b_3(\theta)^3 + b_4(\theta)^4 + b_5(\theta)^5$$
(26)

그러나 ASHRAE[130], 물리적[46] 혹은 Martin 과 Rui [48]와 같은 기타 수학적 함수의 어떤 수가 사용될 수 있다. 2.3.1 절에 기술한 것과 같이 미리 정한 입사각에서의 확정적 측정은 가장 가까운(nearest-neighbour) 내삽과 결합된 검색용 표의 사용을 용이하게 하며 모델의 적용 필요성을 제거해준다.

4.4.3 모델 교정 절차

현재, 모델의 기본적인 방정식을 교정하는데 2 가지 접근법이 있다. 더 오래된 고전적인 방법은 특정 환경조건에 엄격하게 제약된 데이터세트를 사용하면서 각 기본적인 방정식의 구간적 해법을 필요로 한다. 여기서 조사시 열적 시험은 기본적인 방정식을 교정하기 전에 온도계수를 결정하는데 필요하다. 더 새롭고 우선시하는 방법은, 다변수의 회귀분석을 통한 각 기본적인 방정식의 동시 연립 해법을 이용하고, 분리된 조사시 열적 시험은 필요로 하지 않는다. 이 방법에서 각 기본적인 방정식의 모든 계수는 제약 없이 해결된다. 주위 온도/풍속 및 입사각 모델은 독립적으로 교정하는데, 각 교정 방법은 기본적인 방정식을 교정하는 목적으로 선택된다.



선택한 교정 방법과는 무관하게 기본적인 방정식을 교정하기 위해서는 2 개의 데이터세트가 필요하다. 첫째는 "청명(clear sky)" 데이터세트로 2.3 장의 표 3에 주어진 조건을 포괄하고, 반면에 둘째는 "all sky" 데이터세트로 표 4에 주어진 cloudy 조건을 포괄하는 데이터세트와 청명 데이터세트를 병합한 것이다. 청명 데이터세트는 단락전류 I. 의 기본적인 방정식을 교정하는데 독점적으로 사용하고, "all sky" 데이터세트는 나머지 모든 기본적인 방정식을 교정하는데 사용한다. Ic 용으로 clear sky 데이터세트가 필요한 것은 에어매스 함수 f₁(AM)의 주도에 의한 것으로 분광 보정을 대신한다. I_{sc}는 흐린, 특히 구름이 뒤덮인 확산 조건 하에서의 에어매스와는 관련이 없다. 입사각과 선택사항인 온도계수(2.3 장의 표 5에 주어진 조건)를 보정하기 위해서는 별도의 데이터세트가 필요하다. 모든 데이터는 그 품질을 확인하고 분석 전에 필터링하여야 한다. Ise 의 보정은 원칙적으로 어떤 유형의 조사강도 도구로도 가능하다. 그러나 도구 유형과 정확도는 모델 계수에 영향을 주게 된다. 모델 교정을 위한 일반적인 선택으로 광대역 서모파일(thermopile) 기반의 일사량계를 권장한다. 그러나 모델 예측이 기준 태양전지나 실리콘 광다이오드 같은 대체 도구의 조사강도를 참조하는 것으로 미리 알고있다면, 모델 계수는 염두에 둔 그 도구 유형으로 전개시킬 수 있다. 🛵 의 규모는 도구의 선택에 의해 영향을 받을 수 있지만, 그 영향은 에어매스 함수의 교정에서 주로 나타나게 되는데, 이는 기준 소자와의 불일치를 포함하는 분광 영향의 대용 역할을 한다.

D. 고전적인 문제해결 방법

고전적인 방법은 모델의 개발과 병행하여 개발된 피팅 절차를 기반으로 한 것이고, 특수 환경조건에 크게 제약을 받는 데이터세트를 사용하여 각 기본적인 방정식의 구간별 해결에 의지한다[45]. 가장 최근의 방법은 문헌에 상세하게 기술되어 있다[44]. 우선, I_{sc}, I_{mp}, V_{oc} 및 V_{mp} 에 대한 온도계수를 결정한다. 측정된 모듈온도를 사용하여 I-V 곡선 위의 각 측정 포인트를 통상의 기준 온도인, 전통적으로 50°C 에 맞게 변환시킨다. 이렇게 하면, I_{sc} 방정식을 정규화한 조사강도, 단위가 없는 에어매스 함수 및 치수 인자 (I_{sc})의 결과물로 환원시킬 수 있고 그리고 단지 유효 조사강도에 따라서만 변하는 일련의 다항식으로 환원시킬 수 있다.

당초의 해결 방법에서는, clear sky 데이터를 약 1000 W/m² 에 중심을 둔 좁은 범위의 조사강도와 약 AM1.5에 중심을 둔 좁은 범위의 에어매스에서 필터링함으로써 I_{sco} 값을 찾을 수 있었다. 그렇게 되면, I_{sc} clear sky 데이터세트의 나머지는 I_{sco} 로 보정하고 정규화시킨 조사강도가 된다. 에어매스 함수 f₁(AM)의 계수는 에어매스에 대해 이 데이터세트의 다항 회귀를 함으로써 찾을 수 있었다. I_{sco} 과 관련하여 나머지 핵심 인자, I_{mpo}, V_{oco} 및 V_{mp} 는 필터링한 clear sky 데이터세트로부터 찾을 수 있게 된다. 그럼 각 기본적인 방정식의 나머지 항목들은 all sky 데이터세트로부터 찾을 수 있게 된다. I_m 방정식은 유효 조사강도에 대해 회귀를 함으로써 풀 수 있고, 반면에 V_{oc} 와 V_{mp} 방정식은 유효 조사강도의 자연 로그에 대해 회귀를 함으로써 풀 수 있다.

이 방법이 기준조건에 가깝게 측정된 데이터로부터 "STC" 파라미터들을 산출할 수 있다는 측면에서 만족스럽지만, 이들 조건 가까이에서의 불충분한 데이터 때문에 모델의 나머지 부분에도 파급될 수 있는 바이어스 오류를 발생시켜 어려움에 처할 수도 있다. 보다 최근의 방법[131]은 약 1000 W/m² 와 AM1.5에 중심을 둔 좁은 clear sky 데이터세트의 사용을 없앴다. Clear sky 데이터세트를 사용하여, I_{sc} 을 우선 조사강도 보정을 하고 곧바로 4차 다항식을 사용하여 회귀시킨다. I_{sco} 값은 이 다항식을



AM1.5에서 풀면 얻을 수 있다. 다항식 계수를 I_{sco} 로 정규화시키면 단위가 없는 f₁(AM)을 구할 수 있다. 나머지 기본적인 방정식은 all sky 데이터세트를 사용하여 풀게 된다.

E. 동시적인 문제해결 방법

동시적인(simultaneous) 문제해결 방법은 보다 최근의 고전적인 방법에 바탕을 두고 있다. 여기서는, SAPM 용의 기본적인 방정식을 풀기 위해 다양한 환경조건 하에서 수집된 I-V 곡선 풀 세트에 다변수(multivariate) 회귀분석을 적용한다[131]. 이 방법은 고전적인 방법에 비해, 별도의 열적 시험을 없앴다는 측면에서 분명한 장점이 있다. 복잡성을 줄인 것 외에도 이 방법으로, 온도계수의 교정을 작동 중인 태양광 어레이의 조건을 잘 반영하는 정상상태 조건 하에서 할 수 있게 된다. 이는 준안정상태를 나타내는 태양전지 기술용으로 특히 유익하다[132]. 게다가 전압용 온도계수의 결정은 전통적으로 다이오드 인자값을 1로 가정하였다. 1000 W/m² 가까이에서 시험한 결정질실리콘 모듈의 경우, 이 가정이 오류를 일으키지는 않을 것 같다. 그러나 이와 먼 조건에서 이루어진 시험과 박막모듈의 경우에는 이 가정이 오류를 불러올 수도 있다. 고전적인 해결 방법에서는 clear sky 데이터세트를 사용하여 Icc 방정식을 먼저 풀었다. 이 방정식의 해결책이 STC (I_{sco}) 에서의 I_{scr} 에어매스 함수 $f_1(AM)$ 과 온도계수 α_{lsc} 를 산출한다. 이 방정식은 에어매스의 영향을 나타내기 위해 사용한 4차 다항식 항목 때문에 동시에 푸는 것이 매우 어렵다. 실제로, I_{sco}, f₁(AM) 및 α_{isc} 값에 대한 수렴이 얻어질 때까지 이 방정식을 반복적으로 푸는 것이 보다 효과적일 수 있다. 일단 이 방정식이 교정이 되면, 유효 조사강도 E,는 all sky 데이터로부터의 측정된 I, 와 모듈온도를 사용하여 계산할 수 있다. 나머지 방정식은 위에서처럼 풀 수 있지만 온도계수는 모르는 것으로 포함시킨다.

F. 열적 모델

열적 모델은 주위온도와 모듈온도 사이의 연관성을 제공하는 것이다. 기본적인 방정식을 풀기 위해 이 방정식을 푸는 것이 필요하지 않을 수 있으나, 측정된 기상데이터를 SAPM 을 통해 시스템 분석에 적용하는데 있어 유용한 역할을 한다. 방정식 (24)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\ln\left(\frac{T_m - T_a}{G_{POA}}\right) = a + bW \tag{27}$$

이는 clear sky 혹은 all sky 데이터세트를 사용하여 a 와 b 계수를 결정하면 간단하게 풀린다.

G. 입사각

입사각 응답을 측정하는 절차는 2.3 장에서 이미 기술하였다. 이 분석은 결정론적인 시험으로부터 별도의 데이터세트가 필요하다는 점에서 다른 것과는 차별화된다. 입사각 분석은 에어매스 함수와 온도계수를 알 수 있게 통상적으로 기본적인 SAPM 방정식의 교정 후에 이루어진다. 입사각 응답은 온도와 선택적으로 스펙트럼에 대해 측정된 I_{sc} 를 먼저 보정하면 구할 수 있다.

$$I_{sc,Tr,AM1.5} = \frac{I_{sc}}{f_1(AM)[1 + \hat{\alpha}_{Isc}[T_c - T_0]]}$$
(28)

그 다음 하나의 기준 조건 I_{scr} 은 입사각 0°에서 구할 수 있다.



$$I_{scr} = \frac{1}{n} \sum \left[I_{sc,Tr,AM1.5} \left[\frac{G_0}{G_{DNI} + G_{diff}} \right] \right]_n @AOI = 0^{\circ}$$
(29)

정규화시킨 I_{sc} (Nisc)는 각 측정된 값으로부터 코사인 손실을 제거하고 I_{scr} 로 정규화시켜 구할 수 있다.

$$Nisc = \left[\frac{G_0}{G_{DNI}\cos\theta}\right] \left[\frac{I_{sc,Tr,AM1.5}}{I_{scr}} - \left[\frac{G_{diff}}{G_0}\right]\right]$$
(30)

각 입사각에서 얻은 여러 번의 측정은 평균을 하고 표로 만든다. 트랙커 제어시스템이 미리 정해진 입사각에서의 반복적인 시험을 용이하게 할 때 측정된 값들은 여러 날을 통해 평균을 할 수 있다. 이것이 현재 우선시되는 접근법이다. 만약 원하다면, 그 다음에 고전적인 f₂(0) 함수를 산출하기 위해 표로 된 데이터세트를 5차 다항식(방정식 (27)에 피팅을 한다. 역사적으로 이 함수는 평탄한 유리 커버 시트용으로는 충분히 잘 작동하였지만, 현재 사용되는 반사방지 코팅의 존재는 다항식에 불안정성과 진동을 가져올 수 있다. 입사각 0°에서 함수의 기울기를 0으로 제약하면 진동을 약화시킬 수 있다.

H. 온도 계수 (선택적)

온도계수를 측정하는 절차는 2.3 장에 기술되어 있다. 입사각과 같이 이 분석은, 결정론적인 시험으로부터의 별도 데이터세트가 필요하다는 점에서 이 절차에 기술된 다른 것과는 다르다. 기본적인 SAPM 방정식의 교정 이전에 온도계수 분석이 먼저 이루어진다. 이상적으로는 특성분석을 정확하게 1000 W/m² 에서 할 수 있지만, 이는 옥외 특성분석에서는 가능하지 않다. 측정된 포인트들은 측정된 조건으로부터 다시 1000 W/m² 의 조건으로 변환된다. 전통적으로 이런 분석은 기본적인 분석 계수들에는 의지하지 않고, 그 대신에 각각 전류와 전용 조사강도에 대해 선형 혹은 대수적인 응답을 하는 것으로 가정한다. 그리고 다이오드 인자를 1 로 가정하는데, 이는 특히 박막모듈의 경우 전압용 온도계수에 오류를 불러올 수 있다.

Ⅰ_{sc} 와 Ⅰ_{mp} 둘 다는 조사강도에 직접 비례하는 응답을 보이는 선형인 것으로 가정하여 변환한다.

$$I_{1000} = I \left[\frac{G_0}{G_{poa}} \right] \tag{31}$$

V_{oc} 와 V_{mp} 는 조사강도에 대수적인 응답을 가정하여 변환한다.

$$V_{1000} = V - N_s \delta(T_c) \ln\left(\frac{G_{poa}}{G_0}\right)$$
(32)

각기 변환된 값은 그 다음 (T_c-25) 에 대해 선형 회귀한다. 이렇게 얻어지는 기울기가 온도계수이다. SAPM 에서 전류용 온도계수는 전통적으로 1/℃ 의 차원 없는 단위이고, 전압용 온도계수는 V/℃ 의 엔지니어링 단위로 사용되는 점을 주목하여야 한다.



4.5 ISE 모델 대 IEC 61853-3

전세계적으로 태양광 시장의 확대는 태양광 시뮬레이션 도구가 기후 조건, 기술 그리고 그리드 조건에 따라 높은 정확성과 정밀성을 구비하도록 요구하고 있다. 그리고 국제적인 표준화 작업은 이들 조건에 적합한 비교 가능한 수율 평가 결과물 확보와 그리고 투자에 있어서 신뢰성을 얻을 수 있는 보다 믿을만한 예측이 가능하도록 노력하고 있다. 이런 요구에 부응하여, 태양광모듈시뮬레이션 도구는 새로운 시장 요구에 적합하여야 한다. 이번 장에서는 태양광모듈 시뮬레이션용으로 이전에 개발된 접근법의 개요를 소개하고 이를 IEC 의 에너지등급 방식과 비교하고자 한다.

4.5.1 태양광모듈의 에너지등급 시뮬레이션

4.1 장 "According to IEC 61853-3"에서 언급한 바와 같이, IEC 는 태양광모듈 시뮬레이션 모델 IEC 61853 을 2011년에 발간하였다([133] 참조). 서로 다른 옥외 조건 하에서 태양광모듈의 거동을 시뮬레이션하기 위해 IEC 61853-4([134] 참조)에서 6 개의 기준 기후 프로필을 정의하였다. 기준기후 프로필은 태양광산업과 관련되는 글로벌 지역을 대표한다. 각 표준 기준기후 프로필은 만 일년 기간의 시간별 데이터로 구성되는데, 주위 온도, 조사강도, 모듈 높이에서의 풍속, 태양의 위치 그리고 태양광 스펙트럼 파라미터를 포함한다.

모든 기후 프로필과 태양광모듈 시뮬레이션을 위해 다음과 같은 태양광시스템 조건들이 정의되어 있다: 고정 방식의 오픈 랙, 적도를 향함 그리고 20° 경사각.

기술의 특징별로 태양광모듈의 에너지등급을 수행하기 위한 방법론은 4 개의 주요 보정과 계산 단계로 나누어져 있다.

- 1. 입사각 영향
- 2. 분광 보정 영향
- 3. 태양광모듈 온도
- 4. 태양광모듈 효율(ETA)과 출력 산출량

여기에서 4 개 단계를 상세히 기술하고자 한다.

1. 입사각 영향

하루 중 어떤 시간에도 태양광모듈의 거동을 정확하게 시뮬레이션하기 위해서는, 다양한 입사각에서 태양광모듈의 광투과 특성을 기술하는 것이 중요하다. 문헌에 기술된 바와 같이[135], 어레이면에서의 확산 조사강도 (D_{POA})는 문헌 [134]에 정의된 기후 프로필의 데이터와 함께 방정식 (33)을 기반으로 계산한다.

$$D_{POA} = G_{POA} - I_{POA} \tag{33}$$

그 다음에, D_{POA} 와 어레이면에서의 직달 조사강도 (I_{POA})는 4.1 장의 IEC 61853-3 방정식 (1)과 (2)에 각각 나타낸 것과 같이 태양 입사각에 대해 보정한다. 문헌 [136]에 설명된 것과 같이 이들 방정식의 사용은, 사전에 계산해야 할 서로 다른 입사각에서 태양광



모델(입사각 응답)에 들어가는 유효 광투과율을 필요로 한다. 최종적으로 각도 보정한 어레이면의 글로벌 조사강도는 아래 방정식 (34)와 같이 계산된다.

$$G_{POA,AOIcorr} = D_{POA,corr} + I_{POA,corr}$$
(34)

2. 분광 보정 영향

지구상의 위치가 달라지면 다양한 복사 파장과 분광 특성이 나타나게 된다. 그러므로 다양한 태양광 조사강도 수준에서 태양광모듈 응답에 대한 기술은 필수적이다. 태양광모듈의 분광 보정 인자 C_s 는 4.1 장의 방정식 (12)와 같이 계산된다. 이 스텝 이전에, 2 개의 서브 스텝을 수행하여야 한다. 한편, 표준 기준 기후 프로필에 포함된 일련의 독립적인 파장 밴드로 구분된 글로벌 분광 조사강도 G_{POA} 역시 방정식 (35)에서와 같이 입사각에 대해 보정되어야 한다. 다른 한편으로 [136]이 보여주는 것과 같이 태양광모듈의 분광응답 S(λ) 은 파장별로 측정되어야 한다. 끝으로, 분광 보정한 G_{POA} 는 4.1 장의 방정식 (13)에 기술된 것과 같이 계산된다.

$$G(\lambda)_{POA,AOIcorr} = \frac{G_{POA,AOIcorr} * G(\lambda)_{POA}}{G_{POA}}$$
(35)

3. 태양광모듈 온도

태양광모듈 성능의 정확한 기술에서 가장 중요한 인자 중 하나는 온도 의존성이다. 정상 작동 하에서 태양광모듈은 다양한 옥외조건에 노출된다. 태양광기술이 달라지면 온도 변화에 따라 반응이 달라지므로 모듈의 온도계수(*u*0, *u*1)는 [136]에서와 같이 사전에 계산되어야 한다. 이들 계수들은 조사강도와 주위온도의 함수로 모듈의 작동온도를 기술한다. 모듈온도 (T_{mod})는 4.1 장의 방정식 (14)에 정의된 것과 같이 계산한다. 문헌 [134]로부터 추출한 풍속은 Faiman 방법[113]에 의해 기술된 것과 같이 고려한다.

4. 태양광모듈 효율과 출력 산출량

끝으로, 태양광모듈의 출력 산출량은 4.1.4 절[137]에서 기술한 것과 같이 이중선형 내삽으로 계산한다. 계산은, 분광 보정한 T_{mod}, G_{POA} 와 문헌 [133]으로부터 생성된 조사강도와 온도별 태양광모듈의 효율(ETA)을 토대로 한다.

4.5.2 ISE 접근법: Dirnberger 모델

태양광모듈의 출력 산출량을 시뮬레이션 할 수 있는 하나의 모델이 2015년 Dirnberger 에 의해 제안되었다[11]. IEC 에너지등급 모델과 대조적으로 이 방법은 다양한 옥외조건에서 태양광모듈의 응답을 모델링하기 위해 값 비싸고 종합적인 실험실 측정을 필요로 하지 않는다. 하나의 대안으로 Dirnberger 등은 가용한 역사적 데이터와 태양광모듈의 기술적 데이터시트를 기반으로 한다.

Dirnberger 방법은 4 개 대신 5 개의 주 계산 스텝을 제안한다.

- 1. 반사 손실
- 2. 분광 손실
- 3. 태양광모듈 온도
- 4. 25°C에서의 태양광모듈 효율
- 5. 태양광모듈 효율과 출력 산출량



1. 반사 손실

손실의 규모는 특정 위치에서 태양의 위치, 특정 태양광모듈의 기울기와 천정각, 그리고 I_{POA} 와 D_{POA} 의 비에 따라 달라진다. 그러므로 이 접근법에서 반사손실은 I_{POA} 와 D_{POA} 각각에 대해 별도로 계산한다.

I_{POA}의 경우 각 시간 스텝에 대해 입사각과 모듈 반사 거동을 결합시키고, 태양의 위치는 주어진 기울기와 방향각을 고려한다. D_{POA}의 경우는 [11]에 기술한 바와 같이 모든 시간 스텝에 대해 3.5 % 손실을 가정한다. 입사각은 50°와 60° 사이를 평균으로 가정하고 그래서 확산 부분은 등방성인 것으로 고려한다.

끝으로, G_{POA} 반사손실은 양 쪽의 반사손실을 고려한 I_{POA} 와 D_{POA} 의 합이 된다.

2. 분광 손실

분광 손실 계산을 위해서는 문헌 [11]의 3.3 절에 설명된 바와 같이 간단한 방법으로 분광 인자를 고려한다.

3. 태양광모듈 온도

태양광모듈 온도는 방정식 (36)을 따라 간단하게 계산된다. 에너지등급 모델과는 달리 Dirnberger 모델에서의 풍속은 포함되지 않았는데, 단독으로 설치된 모듈에서는 통상적으로 모듈의 기술과는 무관하게 25K 값을 모든 태양광모듈 유형에 대해 고려한다.

$$T_{mod} = T_{amb} + 25K \frac{G_{POA}}{1000W/m^2}$$
(36)

4. 25 °C 에서의 태양광모듈 효율

25℃ 에서의 상대적인 효율을 계산하기 위해 Dirnberger 모델은 Heydenreich[138]가 개발한 모델을 제안하였다. 태양광모듈 효율-조사강도 응답을 단순화시켜 3개의 파라미터 - a, b, c - 로만 기술한다. 이 세가지 파라미터는 [8]에 설명된 것과 같이 2개의 독립적인 소스로부터 이끌어낼 수 있는데, 보통 태양광모듈의 인증된 기술을 나타내는 기술적인 데이터시트와 모듈의 특성 및 점멸 방식의 실험실 측정 2 가지이다.

방정식 (37)은 서로 다른 조사강도 수준에서의 태양광모듈 효율(ETA) 응답을 정의한다.

$$\eta(G_{POA}, T_{STC}) = aG_{POA} + b\ln(G_{POA} + 1) + c\left(\frac{\ln^2(G_{POA} + e)}{G_{POA} + 1} - 1\right)$$
(37)

5. 태양광모듈 효율과 출력 산출량

마지막 스텝으로 주어진 온도와 조사강도 수준에서 태양광모듈 효율은 방정식 (38)과 같이 계산된다. 태양광모듈의 효율(혹은 출력) 온도계수 γ는 장기 모니터링 데이터로부터 얻은 경험적인 값으로 사전에 계산하거나 혹은 기술적인 데이터시트로부터 이끌어낼 수 있다.

$$\eta(G_{POA}, T_{mod}) = \eta(G_{POA}, T_{STC}) \left(1 + \gamma(T_{mod} - T_{STC}) \right)$$
(38)

출력 산출량은 STC 에서의 ETA 대비 순간적인 상대적 ETA, 조사강도 그리고 모듈의 공칭 출력을 가지고 계산할 수 있다.



4.5.3 모델 비교

이 절은 2 개의 서브 절로 나누어져 있다. 첫 번째 서브 절은 문헌 [134]로부터 열대 습한 기후 데이터세트를 사용하여 스텝별로 IEC 에너지등급[133, 134, 136, 137]과 Dirnberger[11] 모델 시뮬레이션 결과를 비교한다. 두 번째 절에서는 IEC 규격에서 기준기후로 제안된 기타 5 개의 다른 위치에서 태양광모듈의 거동을 기술하는 2 개의 시뮬레이션 모델의 결과를 소개한다[134].

두 개의 서브 절 모두에서 다음과 같은 특성을 가진 하나의 태양광모듈이 선택되었다.

- STC 에서 측정된 공칭 출력: 259 W
- 면적: 1.607 m²
- 태양광기술: 다결정실리콘(Poly-Si)
- 측정된 효율 온도계수: -0.42 %

여기서 태양광모듈의 분광응답 S(λ) 은 모든 파장에서 1로 간주하고 입사각 응답 a, 은 0.16으로 간주한다. Faiman 방법 열적 계수는 결정질실리콘 모듈에 대해서는 문헌 [113]에서 결정된 것들이다. IEC 에너지등급 모델에서 스텝 1에서 4는 "github.com"[139] 에서 가용한 "pvpltools-python IEC 61853 open-source 이행 모듈"을 사용하여 계산되었다.

최근 발간 문헌 [140]에서 Heindenreich 모델도 이중선형 내삽 모델(IEC 에너지등급 모델의 스텝 4)과 비교되었다. 이 자료[140]는 Heidenreich 모델과 이중선형 내삽 모델의 대안을 제공하는데 이는 더 향상된 결과를 지향한다.

A. 태양광모듈 시뮬레이션

그림 56은 양 모델의 첫 스텝을 비교한 것이다. 왼쪽에는 4 일간의 시뮬레이션, 오른쪽에는 양 모델의 첫 스텝 결과들의 상호연관성이 나타나 있다. 두 접근법의 결과에서 차이는 크지 않다.



그림 56: 양 모델로부터 첫 스텝 시뮬레이션 결과. 좌: 손실과 보정 후 4일간의 시뮬레이션 결과 비교. 우: 양 모델의 첫 스텝 사이의 상관관계.



그림 57은 양 모델로부터 분광 손실의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 왼쪽은 손실과 보정 후의 4일간의 시뮬레이션 결과의 비교를, 오른쪽은 2 번째 스텝에서 양 모델의 결과 사이의 상관관계를 보여준다. 첫 번째 스텝과 유사하게 결과 간 차이는 크지 않다.



그림 57: 양 모델로부터 분광 손실 시뮬레이션 결과. 좌: 손실과 보정 후의 4일간의 시뮬레이션 결과의 비교. 우: 2 번째 스텝에서 양 모델의 결과 사이의 상관관계.

양 모델의 태양광모듈 온도(step 3)의 결과는 그림 58에서 볼 수 있다. 앞의 두 스텝과는 대조적으로 이 스텝에서는 양 모델 간의 결과 차이가 명백하다. 그림 58 왼쪽에서와 같이 IEC 에너지등급 모델에서는 더 높은 T_{mod} 값이 계산되었다. 그림 58의 오른쪽에서와 같이 25℃ 이상의 T_{mod} 에서 더 큰 차이가 관찰된다.



그림 58: 양 모델로부터 3 번째 스텝 시뮬레이션 결과. 좌: 손실과 보정 후 4일간의 시뮬레이션 결과 비교. 우: 양 모델 3 번째 스텝 사이의 상관관계.

Dirnberger 모델의 순간적인 출력을 계산하기 위해서는 Heydenreich 모델의 3 가지 계수들이 계산되어야 한다. 이 스텝에서는 독일 Fraunhofer ISE CalLab 의 태양광모듈 측정을 고려하였다. 그림 59는 Heydenreich 모델에 기반한 피팅된 곡선과 아래의 계수값을 가진 측정값들을 보여준다.



- a = 0. 007268
- b = -12.455229
- c = -187.738543



그림 59: Heydenreich 모델의 파라미터 피팅 곡선. 푸른 점들은 측정값을 나타내고 푸른 점선은 피팅된 곡선을 나타낸다.

각 모델 마지막 스텝의 결과를 플롯팅함으로써 태양광모듈을 시뮬레이션한 출력 산출량을 비교할 수 있다. 그림 60은 양 모델로 시뮬레이션한 출력 산출량 사이의 차이를 보여준다. 오른쪽 그림에서 출력 산출량이 150 W 보다 더 높으면 상호연관성에서 차이가 보이는데, 이는 더 높은 온도에서 얻은 차이를 따를 수 있다.



그림 60: 양 모델로부터의 마지막 스텝 결과. 좌: 손실과 보정 후 4일간의 시뮬레이션 결과 비교. 우: 양 모델 마지막 스텝 사이의 상관관계.


그림 61은 양 모델로부터 4 일간의 효율(ETA) 결과를 비교한 것이다. 푸른 선은 Dirnberger 접근법의 결과를, 오렌지색 선은 에너지등급 모델의 결과를 보여준다. 붉은 점선은 Fraunhofer ISE CalLab 에서 측정한 모듈의 평균 효율값이다.



그림 61: 양 모델로부터 4 일간의 효율(Four-day ETA) 결과 비교.

양 모델간 차이를 정량화하기 위해서는 양 모델의 각 시뮬레이션 스텝에서의 G_{POA} 대비 상대적인 손실이 계산되어야 한다. 그림 62은 G_{POA} 손실 그리고 양 모델의 각 시뮬레이션 스텝에서의 차이를 보여준다.



그림 62: 열대 습한 기후에서 G_{POA} 의 상대적인 손실. 좌: Dirnberger 2015 모델로부터의 손실. 우: 에너지등급 모델로부터의 손실.

B. 조건에 따른 태양광모듈의 거동

서로 다른 기준기후 프로필에서 G_{POA} 대비 상대적인 손실. 네거티브 표시는 이득을 의미한다. 결과는 아래 그림들에 나타나 있다.

Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems – Climatic Rating of Photovoltaic 모듈 s: Different Technologies for Various Operating Conditions



• 아열대 건조 (사막)



그림 63: 아열대 건조 기후에서 G_{POA} 의 상대적인 손실. 좌: Dirnberger 2015 모델로부터의 손실. 우: 에너지등급 모델로부터의 손실.



• 아열대 해안

온대 해안

•

그림 64: 아열대 해안 기후에서 G_{POA} 의 상대적인 손실. 좌: Dirnberger 2015 모델로부터의 손실. 우: 에너지등급 모델로부터의 손실.



그림 65: 온대 해안 기후에서 G_{POA}의 상대적인 손실. 좌: Dirnberger 2015 모델로부터의 손실. 우: 에너지등급 모델로부터의 손실.

110

Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems - Climatic Rating of Photovoltaic 모듈 s: Different Technologies for Various Operating Conditions



고지대 (3,000 m 이상) •



그림 66: 고지대 기후에서 G_{POA} 의 상대적인 손실. 좌: Dirnberger 2015 모델로부터의 손실. 우: 에너지등급 모델로부터의 손실.



그림 67: 온대 대륙 기후에서 GPOA 의 상대적인 손실. 좌: Dirnberger 2015 모델로부터의

약어 •

손실. 우: 에너지등급 모델로부터의 손실.

D _{POA}	어레이면에서의 확산 조사강도
I _{POA}	어레이면에서의 직달 조사강도
a _r	태양광모듈의 입사각 응답
Cs	분광 보정 인자
S(X)	태양광모듈의 분광응답
u0, u1	Faiman 모델 열적 계수
T _{mod}	태양광모듈 온도
,	

a, b, c Heydenreich 모델의 계수

온대 대륙 •



4.6 선형 성능 손실 분석 - 에너지등급 접근법에 대한 대안

4.6.1 서론

IEC 61853 Part 1 과 Part 2는 재현성이 있고 비교 가능한 방법으로 태양광모듈의 모든 에너지 관련 전기적 특성을 분석할 수 있는 매우 강력한 도구이다[3, 4]. 양호한 측정결과를 가진 태양광모듈 기술은 전기적 안정성이 유지되는 동안에는 모든 기후 대부분에서 잘 작동이 된다. 기후대(규격의 Part 3[5])에 따른 등급과 기준 기후 데이터 자체(Part 4 [6])는 여전히 논의 중이다.

선형 성능 손실 분석(Linear Performance Loss Analysis: LPLA)은 에너지등급 접근법의 대체방안이다. 이는 IEC 61853 에너지등급 규격의 Part 1, 2에 정의된 태양광모듈 측정을 따른다. 반면에 에너지등급 계산에 필요한 G-T 매트릭스 입력데이터는 축소될 수 있다. 게다가 기상 데이터세트는 구조가 다르고 Part 4에 비해 짧다. 근원적인 계산 자체가 Part 3과는 확실히 다르다. Part 3과 비교해 LPLA 의 핵심적 차이는 계산이 더 간단하고, 작동 상황이 정의되어 있으며 양면형 기술에 적합하다는 점이다. LPLA 는 규격에서 정의된 시간별 P_{MPP} 에 대한 고해상도의 시뮬레이션 같은 계산보다 STC 효율에 관련된 태양광모듈 성능에 초점이 맞추어져 있다. 이는 다음에 기술되는 것과 같이 여러가지 장점을 내포하고 있다.

이 연구의 근원적인 결과는 "PV-Klima" 프로젝트로 돌아가는데, 이는 5 개의 기후대에서 다양한 태양광모듈 기술을 조사하기 위해 정부가 지원한 연구 프로젝트이다. 수집된 옥내와 옥외 데이터로부터 LPLA 라고 부르는 에너지등급 접근법이 개발되었다. 이 접근방식의 주요 결과들은 문헌 [40]과 [9]에 발표되어 있다.

4.6.2 접근법

모듈 성능비(MPR)는 특정 작동조건에서 태양광모듈의 에너지수율 성능을 기술하고 비교하는데 널리 받아들여지고 있는 인자이다. 이는 공칭 출력 및 지역적으로 차이가 나는 연간 일사량과는 무관하다. 이 또한 일조시간이 다른 지역들에서의 태양광모듈 성능을 STC 출력과 비교할 수 있도록 한다. 일반적으로 에너지등급 접근법은 가용한 태양에너지 혹은 STC 출력이 아닌 위치에 따른 상대적인 기후 프로필로부터 일어날 수 있는 차이를 확인하는데 초점을 두고 있다. 이는 평균 소자온도, 낮은 조사강도 작동의 비중, 스펙트럼 변화(shift) 및 각도가 수율 성능에 미치는 영향을 의미한다. 기상 프로필(기준으로 주어져야 함)이 태양광모듈의 에너지수율 성능에 어느 정도로 영향을 미치는지는 시험실에서 측정한 전기적 특성분석에 따라 달라진다.

LPLA 는 정의된 작동조건에서 태양광모듈의 성능비(MPR)를 계산하기 위해 관련된 모든 영향 인자들을 고려하는 검증된 접근법이다.

$$MPR_{CALC} = 1 + \Delta MPR_{TEMP} + \Delta MPR_{LIRR} + \Delta MPR_{SMM} + \Delta MPR_{AOI} + \Delta MPR_{SOIL} + \Delta MPR_{BIFA}$$
(39)

이는 영향을 미치는 인자들 각각을 정량화하고, 비교하고 등급을 부여할 수 있게 해준다. 각각의 손실(과 이득) 인자들은 STC(STC 에서의 MPR 은 100 %)의 효율 대비 옥외 성능의 편차를 나타낸다. MPR은 다양한 기상 영향 인자들의 선형 중첩으로 해석한다. 손실 항목 ΔMPR 의 손실은 음(네거티브)의 숫자로 정의되고, 이득은 양(포지티브)의 숫자로 표시됨을 주목해야 한다. 비록 2차 영향은 무시할 수 있지만, 등급 결과와 측정 사이에



±3 % 미만의 차이는 조사된 대부분의 태양광모듈 기술에서 입증되었다[9]. 해당 편차의 상당 부분(통상 ±1.5 %)은 MPR 측정결과에 영향을 미치는 STC 출력 측정값에서 발생한 불확도로부터 기인한 것으로 간주할 수 있다.

IEC 61853-1과 2에 따라 결정된 태양광모듈 데이터가 입력값으로 필요하다. 측정이 요구되는 항목은 다음과 같다.

- a) IEC 61215에 따른 전처리
- b) IEC 61853-2에 따른 분광응답 측정
- c) 입사각 수정기(IAM)의 측정
- d) IEC 61853-1에 따른 축소형 매트릭스 측정 (G: 100~1100 W/m², 온도 25℃ 에서만)
- e) IEC 61215에 따른 온도계수 (1000 W/m² 에서만)
- f) IEC 61853-2에 따른 NMOT

A. 온도 손실:

온도 손실 ΔMPR_{TEMP} 는 공칭 출력의 온도계수(TC: γ)와 특정 기후에서 소자의 작동온도로부터 계산한다. TC 는 실험실에서 측정하고, 작동온도는 설치 현장에서 측정한다. ΔMPR_{TEMP}는 아래 식과 같이 계산한다.

$$\Delta MPR_{TEMP} = \gamma \left(\overline{T_{BOM,G}} - 25^{\circ}C \right) \tag{40}$$

여기서

$$\overline{T_{BoM,G}} = \frac{\int_T T_{BoM} G_{PoA} dt}{\int_T G_{PoA} dt}$$
(41)

은 조사강도를 반영한 연평균 소자온도이다. 기후별로 온도 손실의 규모는 그림 68에 나타나 있다. .





그림 68: 태양광모듈 기술별로 4 개 위치(컬러 코드, 청색: Cologne, 녹색: Ancona, 적색: Tempe, 오렌지: Chennai)에서의 온도계수 γ 와 조사강도 가중 평균 모듈온도. 온도와 관련된 성능 차이 ΔMPR_{Temp} 은 ΔMPR_{Temp} = - 1 %에서 - 12 %까지의 범위에서 등치선(iso-lines)으로 표시되어 있다(Source: [40]).

등급을 매길 시료들이 없기 때문에 NMOT 값으로부터 외삽하여야 한다. 소자온도는 각 기준 기후별로 주어진 기준 온도 NMOT_{REF} 와 T_{REF}로부터 계산할 수 있다.

$$T_{DUT} = T_{REF} \cdot \frac{NMOT_{DUT}}{NMOT_{REF}}$$
(42)

B. 낮은 조사강도 손실:

광전류는 조사강도와 직선관계를 가지나 대부분의 태양광모듈의 출력은 조사강도에 따라 비선형 의존성을 나타낸다. 이처럼 어떤 조사강도에서 어느 정도의 태양에너지가 차단되는지 알아야 한다. ΔMPR_{LIRR} 은 아래와 같이 계산된다.

$$\Delta MPR_{LIRR} = \left(\frac{\int_{T} p(G_{PoA})G_{PoA}dt}{\int_{T} G_{PoA}dt}\right) - 1$$
(43)

여기서

$$p(G_{PoA}) = \frac{P_{Max,Meas}G_{STC}}{P_{Max,STC}G_{Meas}}$$
(44)

은 25℃ 에서 100~1100 W/m² 범위에 있는 7 개의 조사강도에 대해 실험실에서 측정한 낮은 조사강도의 거동이다.



C. 분광 손실 혹은 이득:

태양광 분광 분포의 변화에 따른 영향은, IEC 60904-3[41]의 기준 조사강도에 따라 얻은 AM1.5 기준 분광 조사강도 E_{STC} 를 사용하여 IEC 60904-7 규격에 근거한 분광 불일치 인자로 고려한다[42]. ΔMPR_{SMM}은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta MPR_{SMM} = \frac{\int \overline{E_{SUN}(\lambda)} \cdot SR_{DUT}(\lambda) d\lambda}{\int \overline{E_{SUN}(\lambda)} \cdot SR_{REF}(\lambda) d\lambda} \times \frac{\int E_{STC}(\lambda) \cdot SR_{REF}(\lambda) d\lambda}{\int E_{STC}(\lambda) \cdot SR_{DUT}(\lambda) d\lambda} - 1$$
(45)

추가적인 입력 데이터는 연 평균 분광 조사강도 E_{SUN}, 일사량계의 분광응답 SR_{REF} 그리고 시험 소자의 분광응답 SR_{DUT} 이다. 여름과 겨울의 "blue(단파장)"와 "red(장파장)" 이동(shift)이 연간 기준으로는 상쇄되므로 일별과 계절별 영향은 연간 영향보다 더 클 수 있다.

D. 각도 손실:

각도 손실은 다양한 각도에 대해 계산한다. 다양한 각도에 대한 밴드별 에너지는 태양광의 직달 성분과 확산 성분의 합으로 계산된다. 확산 성분 부분에 대해서는, 반공간(half-space) 하늘에서의 분포는 선형이라고 가정할 수 있다. 직달 부분은 어레이면에서 직달 조사강도를 받기 위해 직달 조사강도 측정을 입사각으로 코사인 보정한다. 유리 돔을 포함한 일사량계의 각도 응답은 이상적인 코사인 거동을 만족시키는 것으로 고려한다. ΔMPR_{AOI}은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta MPR_{AOI} = \left(\frac{\int_{T} p(AOI)G_{PoA}(AOI)dt}{\int_{T} G_{PoA}dt}\right) - 1$$
(46)

여기서

$$p(AOI) = \frac{I_{SC,Meas}(AOI)}{I_{SC,STC} \cdot \cos(AOI)}$$
(47)

은 실험실에서 측정한 반사율에 기인한 코사인 거동에 편차를 가진 평평한 시료의 각도 응답이다.

E. 양면형 작동에 따른 이득:

양면형 작동에 따른 이득은 후면으로부터 들어오는 가용한 에너지와 시험 소자의 양면형 계수로 고려한다. 후면의 에너지 차단을 적절히 나타내기 위해서는 기후별로 사이트에 따라 특정의 알베도 값이 상수로 주어져야 한다. ΔMPR_{BIFA} 은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta MPR_{BIFA} = \varphi_{Pmax} \frac{H_{rear}}{H_{front}}$$
(48)

여기서 φ_{Pmax} 는 IEC TS 60904-1-2[55]에 따라 다음과 같이 계산되는 양면형 계수이다.



F. 오염의 영향:

오염에 의한 연간 손실은 클리닝 절차뿐 아니라 비나 모래폭풍처럼 계절적으로 발생하는 요인에 크게 의존한다. 그러므로 오염으로 인한 연간 손실의 경우에는 각 기후별로 상수값을 고려하여야 한다. 오염 방지 코팅이나 깊게 텍스쳐 처리한 전면 유리의 경우에는 오염 인자를 달리 적용할 필요가 있음을 주목해야 한다.

G. 추가적인 측면:

작동 효율 등급(rated operational efficiency) η_{OP} 는 다음과 같이 STC 에서의 측정 효율과 MPR_DUT 등급으로부터 계산할 수 있다.

$\eta_{OP} = MPR_{DUT} \times \eta_{STC,Lab}$

(50)

LPLA 접근법은 STC 에서의 성능 대비 현장에서의 성능을 토대로 시료의 등급을 매길 수 있다. 데이터시트에 공인된 것보다 더 낮은 출력을 가진 시료에 좋은 에너지등급이 부여되는 것을 방지하기 위해서는 STC 출력을 별도로 관리하여야 한다. 일반적으로 공인된 STC 출력은 생산 라인에서의 평균을 반영하여야 한다. 그렇지 않은 경우, 필요에 따라 등급 결과에 출력 보정인자를 적용할 수 있다.

LPLA 의 또 다른 실제적 활용분야의 하나로 옥외 성능의 단기 분석이 그 대상이 될 수 있다. 그림 69의 태양광 성능의 월간 변동폭 측정결과가 이를 입증하고 있다. 온도와 분광 영향에 LPLA를 적용하면 계절별 MPR 변화의 이유를 밝힐 수 있다.





그림 69: 4 개 유형 태양광모듈에 대하여 STC 에서 측정한 월간 출력 기반 MPR 대비 STC 에서 공인된 출력 기반 월간 모듈의 성능비, 100 %에서 벗어난 편차는 수율의 손실 혹은 이득을 의미한다. 온도(오렌지색)와 분광 영향(자주색)의 기여분이 시각화되어 있다. 시험 장소는 이탈리아 Ancona 이다[Source: [14]).

4.6.3 단순화한 사용 케이스

이번 장에서는 이탈리아 Ancona(13°N/80°E, 해수면 고도 35 m)에서 최적조건 하에서 작동하고 있는 다결정실리콘 모듈에 대해 LPLA 를 가장 간단한 형식의 1 페이지로 설명 하고자 한다. 최적 장착조건은 남향에 최적의 기울기 각도, 음영은 없으며 분리된 장착구조를 사용함으로써 소자온도가 낮음을 의미한다. 각각의 ΔMPR 손실 인자들을 하나씩 계산하여 요약하였다(그림 70의 보고 사례 참조). Г



٦

Loss factor	ΔMPR_{TEMP}	$+\Delta MPR_{LIRR}$	$+\Delta MPR_{MMF}$	$+\Delta MPR_{AOI}$	$+\Delta MPR_{soil}$	$+\Delta MPR_{BIFA}$	$= MPR_{CALC}$	
Result	-3.83%	-0.82%	0.56%	-2.43%	-0.50%	0.00%	92.98%	
ΔMPR_{TEMP} :								
	γ _{DUT} (%	6/K)		T _{REF} (°C)				
	-0.4	3		33	.9		-3.83%	
AMPR _{LIRR} :								
Irradiance (W/m²)	range) (03	H(G) Italy 8.01.2014 – 07.01	.2015)	PV module $p(G_{PoA})$		p(6	$p(G_{PoA}) \ge H(G)$ Italy	
15 - 15	0	5.95%		0.9	47		0.056	
150 - 25	50	6.38%		0.9	70		0.062	
250 - 35	0	6.62%		0.9	85		0.065	
350 - 45	50	6.61% 7.00%		0.9	99		0.066	
550 - 65	50	8.04%		1.0	00		0.070	
650 - 75	50	9.64%		1.0	00		0.096	
750 - 85	50	11.78%		1.0	00		0.118	
850 - 95	50	12.68%		1.0	00		0.127	
950 - 10	50	16.37%		1.0	00		0.164	
1050 - 14	100	8.73%		0.996			0.087	
\sum 100 % (= 1291 kWh/m ²)		²)	ΔMPR_{LIRR}			-0.82%		
ΔMPR _{MMF} :								
				ΔΜΡ	R _{MMF}		+0.56%	
ΔMPR_{AoI} :								
Angular rar	nge (°) (03	H(AOI) Italy 8.01.2014 - 07.01	.2015)	PV modu	le p(AOI)	REF p	(AOI) x H(AOI) Italy	
90		0.00%		0.	00		0.00%	
85		0.56%		0.	14		0.08%	
80		1.19%		0.65			0.78%	
73		2 79%		0.79			2 44%	
65		3.64%		0.	92		3.36%	
60		4.63%		0.96		4.44%		
55		5.63%		0.97			5.48%	
50		6.56%		0.99			6.48%	
45		7.31%		0.99			7.26%	
40		8.12%		1.00			8.10%	
30		10 45%		1.00			10.46%	
25		8.74%		1.00			8.75%	
20		8.53%		1.00			8.53%	
15		8.70%		1.00			8.70%	
10		7.48%		1.00			7.47%	
5		3.62%		1.	00		3.62%	
0		1.14%		1.0	00		1.14%	
Σ		100 % (= 1249 kWh/m	²)	ΔMF	PR _{AOI}		-2.43%	

그림 70: 이탈리아에서 운영 중인 표준형의 결정질실리콘 모듈 시료에 대해 LPLA 방법을 토대로 한 에너지수율 계산결과 보고의 사례.



4.6.4 결론

LPLA 를 사용하여 대체가능한 하나의 에너지등급 방법이 소개되었다. 이 접근법은 실제 적용을 위해 최적화되었고, 양면형을 포함한 모든 비집광형 태양광모듈에 적합하다. 이 방법의 장점은 에너지등급 계산이 간편하고, 부족한 기상 데이터세트의 편집이 용이하다는 것이다. 이는 IEC 규격 태양광모듈 특성분석 Part 1과 2를 따르는 반면, 매트릭스는 축소될 수 있다. 모든 영향 인자들에 대한 독립적인 분석으로 태양광모듈 성능의 분류가 가능해 진다. 이 방법에 기반한 미래 태양광모듈 에너지등급 분류는 IEC 60904-9[39]에 따른 솔라 시뮬레이터의 분류와 유사하게 보일 수 있다. 예를 들어 CBABB 로 분류된 태양광모듈은 만족스럽지 못한 온도 거동(C), 평균 수준의 낮은 조사강도에서의 성능(B), 우수한 분광 이득(A), 평균 수준의 각도와 오염 손실(B,B), 그리고 양면형 작동이 아닌(C) 모듈에 해당할 수 있다. 그러나 전기적 파라미터의 안정성뿐 아니라 작동온도(NMOT)는 여전히 현장에서 시험되어야 한다. 다른 연구기관에 의한 해당 방법의 검증은 현재 진행 중이며 기준 데이터세트의 제정 및 국제적 합의가 필요하다.

4.7 양면형 태양광모듈의 에너지등급

4.7.1 양면형 모듈의 새로운 면

4.1 장에서 설명한 바와 같이 단면형 태양광모듈에 대해 규격 IEC 61853-3에 정의된 기후 특성에 따른 에너지등급(CSER)은 단일 태양광모듈의 연간 DC 수율 E_{MOD,YEAR} 를 STC 에서의 최대출력 산출량(P_{STC})과 연간 면내 조사량 H_{POA} 에 정규화시킨 것이다(4.1.4 절의 방정식 (15) 참조).

이는 변수 이름에서의 차이를 제외하고는 IEC 61724-1 [141]에 있는 성능비(PR)의 정의와 매우 유사한데, 완전한 태양광시스템의 모니터링을 다루는 것이다.

$$PR = \left(\frac{E_{out}}{P_0}\right) / \left(\frac{H_i}{G_{i,ref}}\right)$$
(51)

만약, 모듈 외의 모든 구성 성분이 PR 평가로부터 배제되면 이 방정식은 CSER 정의와 동일하다. 그러므로 CSER 값을 때로는 DC-PR 혹은 Module PR (MPR)로 나타내기도 한다. 일반적으로 MPR 은 G_{POA}, T_{AMB}, V_{WIND} 같은 환경조건과 특정 태양광모듈의 일련의 특성 세트에 의존한다.

MPR = f (G_{POA}, T_{AMB}, V_{WIND}, 모듈 특성) (52)

모듈 특성은 통상적으로 시험실에서 결정하고, 하나의 단일 모듈 유형에 특정되는 것이다. IEC 61853-3에 있는 계산절차는 해당 특성들을 정의된 기상조건에 연결시킨다.

기타 시스템 구성 성분(실제 현장에서 보이는 대로)의 영향은 어떤 것이라도 배제한다. 이는 인버터와 배선의 경우 명확한데, 장착의 기하학적 구조로부터의 어떤 영향도 또한 배제한다. 행과 행 사이에 음영이 없고, 대신에 태양광모듈은 완벽하게 균일한 태양광에 노출되는 것으로 가정한다. 또한, 서로 아래위로 장착된 모듈의 개수가 모듈온도에 미치는 영향도 없다. 유일한 예외는 알베도로 이는 본질적으로 고려되어야 하는데, 왜냐하면 G_{HOR} 으로부터 G_{POA} 로의 통상적인 전위 모델이 경사진 어레이면에서의 반사된



조사강도 부분을 고려하기 때문이다. 여기서는 디폴트값으로 20 %를 표준 데이터세트 뒤에서의 모든 계산에 사용하였다.

지금까지 IEC 61853에 정의된 에너지등급 절차는 단면형(표준) 태양광모듈에 대해서만 검증되었다. 이 절차는 6 개 기후 지역의 하나에서 작동 중인 태양광모듈의 예상 DC 수율을 비교하고 평가할 수 있게 한다. 위에서 본 바와 같이 단면형 태양광모듈의 에너지등급 프로세스에는 여러가지 단순화 기법이 이미 존재하고 있다. 양면형 태양광모듈과 관련하여 한층 더 단순화가 필요하다. 아래에서는 이 부분에 대해 설명하고자 한다.

우선, 양면형 모듈을 처리할 때, MPR 정의의 변화는 간단하게 보이는데, MPR = f (G_{FRONT}, G_{REAR}, T_{AMB}, V_{WIND}, 더 많은 모듈 특성) 이다.

후면 조사강도 G_{REAR} 와 양면형 태양광모듈 특유의 많은 특성들이 이전 방정식에 추가되어야 한다.

추가적인 모듈 특성의 결정은 오히려 간단해 보인다. 모듈의 후면에 대해서는 여러 가지 측정들이 반복될 필요가 있다. 그 다음 일부 값들은, 예를 들면 양면형 계수 φ 와 같은 측정으로부터 계산되어야 한다. 보다 상세한 내용은 2.5 장의 양면형 모듈 특성분석 논의를 참고할 수 있다.

G_{REAR} 를 적절하게 결정하는 것이 관건이다. 단면형 모듈이 받는 총 조사강도 G_{POA} 의 추정은 쉽다. 경사진 면에서 받는 조사강도 수준을 계산하는 전위 절차가 개발, 검증되어 10여 년 전에 합의가 이루어졌다. 이 절차에서는 태양, 하늘 및 지면 반사에 의한 조사강도 기여분들이 포함된다. 특정 모델이나 절차의 선택이 차이를 만들 수 있는데, 연간 조사량으로 1~2 % 범위의 작은 차이에 불과하다.

양면형 태양광모듈에서 후면 조사강도 G_{REA}와 그 균질성은 다음 항목에 의존한다.

- 지면의 알베도(반사율)
- 지면 위 태양광모듈의 높이
- 태양광모듈 기울기 각도
- 태양광모듈 행(row) 사이의 거리(와/혹은 태양광시스템의 크기)
- 모듈 장착 시스템의 구조적 요소들

그러므로 동일 위치에 있는 동일한 태양광모듈이라도 시스템 설계 인자들에 따라 성능은 크게 달라질 수 있다. 양면형 태양광모듈의 수율은 모듈 특성은 물론이고 시스템 특성에도 의존한다.

표 16은 실제 설치된 수많은 양면형 모듈의 다양한 이득에 대한 사례를 제공하는데, 양면형 이득은 모듈 전면의 수율 대비 후면 기여분의 비를 나타낸다. 양면형 이득의 차이가 2 배에 이르는 것은 유사한 장착 모드에 동일한 양면형 태양광모듈을 사용한 경우에도 쉽게 생길 수 있다. 이는 G_{POA} 에 대해 잘 알려진 전위 모델에서의 변동성보다도 훨씬 더 크다. 그러므로 모델링에서의 작은 불확도는 시스템 설계가 미치는 실제 영향에 비해 무시할 수준이다.



유형	높이	기울기	알베도	GCR	BG _{MOD}	참고
	m	0				
ground mounted	0.7	30	0.20	0.43	5%	(1)
ground mounted	1.0	30	0.20	0.40	8%	(2)
ground mounted	0.5	30	0.20	0.40	9%	(3)
ground mounted (agro PV)	4.0	5	0.20	0.66	13%	(2)
ground mounted (vertical)	0.0	90	0.20	n/a	80%	(4)
roof top	0.1	20	0.40	0.40	6%	(5)
roof top	0.3	20	0.40	0.40	11%	(5)
roof top	0.5	20	0.40	0.40	14%	(5)
roof top	0.3	20	0.20	0.40	6%	(5)
roof top	0.3	20	0.40	0.40	11%	(5)
roof top	0.3	20	0.60	0.40	16%	(5)
pole mounted	5.0	60	0.20	n/a	24%	(6)

표 16: 상당히 유사한 양면형 모듈을 사용한 여러 개의 실제 시스템에서 얻은 양면형의 이득 값. BG_{MOD}는 전면의 수율 대비 추가적인 DC 수율을 나타낸다.

참고: 높이는 가장 낮은 모듈 가장자리로부터 지면까지의 거리를 의미한다; GCR 은 지면 커버 비, 즉 지면 면적 대비 모듈 면적의 비를 의미한다; (1) 3 개 모듈을 풍경화 모드로; (2) 1 개 모듈을 풍경화 모드로, 장착 구조 고려 않음; (3) 2 개 모듈을 초상화 모드로; (4) 일렬로, 30° 남향 그리고 단면형과 비교했을 때 BG_{MOD} 는 9 %에 불과; (5) 장착 구조 고려 않음; (6) 예를 들면 소규모 off-grid 용으로 사용.

장착 조건 역시 2 가지 측면에서 후면 조사강도의 균질성에 영향을 미친다. 첫 번째, 각 태양전지의 후면 조사강도 균질성은 장착 기하적적 구조에 의존한다. 통상적으로, 모듈 가장자리에는 더 높은 조사강도 수준이 관찰되고, 태양광모듈이나 테이블의 중심에서는 그 수준이 더 낮다. 가장자리는 통상 지면의 밝은 부분을 향해 혹은 하늘의 확산광을 바라보는 각도가 더 크기 때문에 모듈의 중심보다 더 많은 빛을 받게된다.

두 번째, 균질성은 장착 구조의 설계에 의존한다. 모듈의 후면 가까이에 있는 기둥이나 레일 같은 구조적 요소들은 후면 확산 조사강도에 대해 일종의 국부적인 음영을 발생시키는데, 기하학적인 불균질성 때문에 태양전지의 성능 불일치를 증가시키는 요인이 된다.

그림 71은 2 가지 불균질성 유형의 사례를 제공한다. 후면 조사강도는 가장자리로부터 모듈의 중심 쪽으로 감소하는데, 중심에 있는 몇몇 셀들은 흔하지 않게 조사강도의 증가를 보이기도 한다. 이런 특수한 1-축 트랙커의 설계를 활용하면 직달 태양광은 중앙의 토우크 튜브로부터 반사되고 이 위치에서의 후면 조사강도를 증가시킨다.





Position W--E [mm]

그림 71: 수평의 1-축 트랙커 위에 초상화 모드로 장착된 2 개 모듈을 가로지르는 조사강도 수준(6월 21일 정오에 본보기 목적으로 하나의 시간 스텝의 경우). 후면 조사강도는 대부분 가장자리로부터 트랙커 테이블의 중심 쪽으로 직선 모양의 감소를 보여준다. 이런 특수 설계를 활용하면 중심 튜브 위에서의 반사가 조사강도를 모듈의 내부 가장자리 가까운 수준으로 증가시키게 된다.

요약하면, 하나의 새로운 정량값인 G_{REAR} 가 모듈 성능의 예측이나 평가에 큰 변화를 만들고 있다. 이는 순수한 기상학적 수량이 아니고 여러가지 범위의 시스템 특성에 의존한다. 지면 커버 비와 지면 위 높이는 후면 조사강도보다는 일반적인 영향을 미치나, 구조적인 설계는 셀 수준의 후면 조사강도에 영향을 미친다. 더 이상 모듈 특성과 환경조건을 명확하게 구분할 수 없다. 어떤 에너지등급 절차라도 보다 간단하여야 하는데, 수많은 단순화 작업 심지어는 규제를 도입할 필요도 있다. 이들 단순화와 규제에 관해서는 IEC 61853-4를 대상으로 하여 4.7.4 절에서 상세히 논의할 것이다.

4.7.2 IEC 61853 - 4 개 Part 에 필요한 변경

위 서론에서 논의한 난제에도 불구하고, IEC 61853 규격을 양면형 태양광모듈에까지 확장하는 것에 대한 논의가 현재 진행 중이다. 이런 노력의 상당 부분은 EU EMPIR 프로젝트 "PV-Enerate: Advanced PV Energy Rating" (https://www.pv-enerate.ptb.de)에 포함되어 있다. 이 프로젝트에 포함된 실무 그룹들은 규격의 업데이트를 지원하기 위해 IEC 기술위원회(technical committee: TC) 82 "Solar photovoltaic energy systems"에 자료를 제공하는 것을 목표로 하고 있다. PV-Enerate 에서 논의된 확장 내용은 아래와 같다.

IEC 61853-1 조사강도와 온도 성능 측정 및 출력 등급

PV-Enerate 전문가들은 IEC TS 60904-1-2[55]에 정의된 G_E-방법에 따른 양면형 태양광모듈 출력 측정을 제안한다. 이 방법은 전면에서만 등가(equivalent) 조사강도 수준 (G_E)의 개념을 이용하는데, 이렇게 하면 2.5 장에서 설명한 바와 같이 주어진 전면과 후면 조사강도 수준의 조합에서 얻을 수 있는 것과 동일한 I_{SC} 값으로 이어진다. 경비 절감이



가능한 이 접근법을 사용하면 (G_E; T_{MOD})의 함수로 모듈 출력 측정 매트릭스를 단면형 모듈의 절차와 유사하게 만들 수 있다.

그러나 측정 범위는 더 높은 조사강도 수준으로 확대할 필요가 있는데, 그 이유는 여러 개의 기준 데이터세트로 양면형 모듈의 조사강도를 계산할 때 G_E는 쉽게 1100 W/m² 를 초과할 수 있기 때문이다.

IEC 61853-2 분광응답, 입사각과 모듈 작동온도 측정

분광응답 측정과 입사각 의존성 측정 모두는 양쪽 모듈 면에 대해 독립적으로 이행할 수 있다(다른 면은 커버를 하거나 실험실의 어두운 쪽을 향하게 함). 열적 파라미터 u0 와 u1 의 결정은 IEC 61853-2에 정의된 것과 같이 옥외 방법을 사용하여 할 수 있다.

IEC 61853-3 태양광모듈의 에너지등급

입사각의 보정은 양쪽 면에 대해 독립적으로 이행할 수 있다. 입사각이 태양의 위치에 무관하기 때문에 조사강도에 대한 입사각의 적절한 정의가 필요하다. 이상적으로는 반사된 조사강도의 모든 기여분에 대한 평균과 가중 입사각에 기반하여 일반화된 입사각을 정의할 수 있을 것이다. 이 개념은 때때로 태양광모듈의 전면 조사강도의 확산 성분용으로 사용할 수 있으나 양면형에 대해서는 아직 합의에 이르지 못하고 있다.

분광 보정 역시 양쪽 면에 대해 독립적으로 이행할 수 있다. 그리고 규격의 Part 4 는 모듈의 양쪽 면에 대해 분광 조사강도 데이터를 제공하는 것으로 가정할 수 있을 것이다.

이런한 보정 후에 양쪽 모듈 면의 총 유효 조사강도를, G_{EFF} = G_{FRONT} + G_{REAR} 와 같이 계산할 수 있을 것이다. G_{EFF} = G_{FRONT} + φ G_{REAR} 를 사용한 양면형 수율 추정용으로 알려진 유사한 접근법은 여기서는 적합하지 않다는 것을 주목해야 한다. 양면형 인자 φ 는 MPR 혹은 CSER 에 대해 직접 영향을 미쳐야 하는데, φ 이 조사량 자원에 미리 포함되면 그 영향이 상쇄될 것이다.

모듈 작동온도 T_{MOD} 는 기존 절차에서와 같이 총 조사강도 G_{EFF} 로부터 계산할 수 있고 모듈출력 P_{MOD} 역시 각 시간 스텝별로 정의된 방식에 따라 매트릭스 측정 (G_{EFF}; T_{MOD})으로부터 유도할 수 있다. 이렇게 하면 최종적으로 양면형 태양광모듈의 연간 DC 수율 E_{MOD,YEAR} 을 얻을 수 있게 된다.

최종 결과로 얻은 CSER 값의 계산과 관련한 또 하나의 결정은 아직 미결 상태이다. 단면형 태양광모듈의 경우, 모듈 DC 수율은 면내(전면) 조사량 E_{POA} 에 적용된다. 만약 E_{POA} (= E_{FRONT})가 양면형 태양광모듈에서도 역시 기준이라면, CSER 값이 1 보다 더 클 수도 있다. CSER 값들을 1 보다 더 작게 유지하고 단면형 모듈 값들과 비교하기 위해서는 연간 DC 수율이 총 유효 조사강도 H_{EFF} 에 적용되어야 할 것이다. 1 보다 큰 CSER 값들이 동일한 물리적 크기의 태양광모듈의 확장된 수율을 대표하는지 혹은 효율값들(입력 대비 출력 비교)이 어떤 시간에도 1 이하로 유지해야 되는지는 철학의 문제이다.

IEC 61853-4 표준 기준 기후 프로필

단면형과 양면형 태양광모듈 모두, 어레이면에서의 조사강도(G_{POA})는 태양광모듈 장착조건에 의해 결정된다. 단면형의 경우, IEC 61853-3 규격은 고려중인 6 개 모든 기후 지역용으로 단일의 표준 설치조건을 정의하는데, 문자 그대로 "20°의 경사각을 가지고 적도를 향함"이다[5]. 따라서 IEC 61853-4는 해당 단일 조건과 6 개 지역 각각에 대한 시계열 G_{POA}(그리고 다른 수량들)를 제공한다[6].



앞에서 설명한 바와 같이, 양면형 태양광모듈이 받는 연간 총 조사량은 기울기 각도만이 아니라 더 많은 파라미터에 의존한다. 이런 많은 영향들을 어떻게 처리할 것인가? 에너지등급은 모듈 특성만을 평가하므로 특정 시스템 설계로부터 기인한 영향은 배제해야 한다. 이를 달성하는 유일한 길은 시스템 설계를 표준화하는 것인데, 다시 말해 가능한 활용 케이스를 매우 적은 수의 레이아웃에 한정하는 것이다.

이런 모범적인 장착 조건을 양면형 태양광모듈의 "표준 설치조건(Standard Mounting Conditions: SMC)"으로 정의할 수 있다. 그 다음, IEC 61853-4의 기존 버전에 있는 G_{POA}와 유사하게 이들 조건용으로 G_{FRONT} 와 G_{REAR} 를 제공할 수 있을 것이다. 아래에서 이 접근법에 대해 상세 설명을 하고자 한다.

4.7.3 표준 설치조건과 단순화

표준 설치조건(SMC)의 후보로 여러 가지 장착 옵션/케이스를 논의하였다. 가장 돋보이는 옵션들은 다음과 같다.

- 고정 기울기 지면 장착(통상 알베도 20 %) (단면형 모듈의 기존 정의에 매우 가깝다)
- 밝은 지붕외피를 갖춘 평평한 지붕 위에 고정 기울기 장착 (통상 알베도 60 %)
- 수평면 1-축 트랙커 (통상 알베도 30 %) (현재 양면형 태양광모듈 시장의 큰 몫을 점유)
- 동-서 방향으로 수직 장착 (통상 알베도 20%) (예: 소음 방지벽, 농업용 태양광)

모든 단일 옵션은 주목할 만한 규모의 새로운 기상 데이터세트를 필요로 하므로 최종적으로 옵션의 개수는 평평한 지붕 위에 고정 기울기 장착과 수직 동-서 방향 장착의 2 가지로 축소되었다. 그림 72가 이런 종류의 양면형 태양광시스템의 사례를 보여주고 있다.



그림 72: 양면형 태양광모듈 에너지등급용으로 선택된 2 가지 표준 설치조건의 사례. 좌: 평평한 지붕 위에 고정 설치, 기울기 각도 = 20°, 알베도 = 60%. 우: 농업용 지면 위에 수직 동-서 방향 설치, 알베도 = 20%. *Photos: Christian Reise, Next2Sun.*



물론, 큰 태양광시스템에 설치된 태양광모듈들은 상호간에 영향을 미칠 수 있다. 단면형 태양광시스템에서는 이 영향이 여러 줄로 설치된 모듈 사이의 상호 음영에 그칠 수 있다. 단면형 모듈의 기존규격은 그 정의에서 음영을 배제한다. 음영이 없는 단일 태양광모듈을 가정할 때, 이는 큰 시스템에서 첫 번째 줄에 설치된 모듈에는 적합할 수 있다.

양면형 태양광시스템의 경우에도 주변 지면이 음영 혹은 비음영이라고 하는 것이 적절하다. 고정 기울기로 장착된 단일 태양광모듈이 중간 줄에 설치된 모듈보다 더 많은 후면 조사강도를 받을 것이다. 그러나 "한 줄로 설치된 모듈" 시나리오가 단일 모듈보다는 실제 현장에서의 작동에 훨씬 더 적절할 수 있다. 그래서 길게 하나의 줄로 설치된 모듈 중 중앙의 모듈이 기준 케이스로 제안된다.

두 가지 SMC 각각에 대해 하나의 알베도 값, 하나의 지면 위 높이 그리고 기타 파라미터용으로 하나의 값이 설정되었다. 모든 종류의 변동 (큰 폭의 양면형 성능 변화로 이어짐, 이번 장의 서론 참조)은 IEC 61853의 범위 밖으로 시스템 특유의 수율 추정에 맡겨둔다.

4.7.4 추가적인 기준 데이터세트의 준비

IEC 61853 시리즈 규격을 사용할 때, 대부분의 모델링 노력과 관련된 모호성을 피하기 위해 시간별 G_{POA} 값을 가진 시계열과 기타 입력 수량들이 규격의 Part 4에 주어진다. 6 개 기존 데이터세트 각각은 이미 44 개의 컬럼을 포함하고 있다.

- 타임 스탬프
- 주위 온도
- 모듈 높이에서의 풍속
- 태양 고도각과 입사각
- 글로벌 수평면 조사강도
- 직달 수평면 조사강도
- 글로벌 면내 조사강도 @ 20°
- 직달 면내 조사강도 @ 20°
- 32 개의 스펙트럼 밴드로 구분한 글로벌 면내 조사강도

양면형 태양광모듈에서 사용할 확장 데이터세트는 78 개 혹은 142 개의 추가 칼럼이 제공될 수 있다.

- 루프탑 높이에서의 풍속
- 새로운 3 개 면 방향에 대한 태양 입사각
- 글로벌 동쪽 수직 조사강도
- 직달 동쪽 수직 조사강도
- 글로벌 서쪽 수직 조사강도
- 직달 서쪽 수직 조사강도
- 글로벌 후측면 조사강도 @ 20°
- 직달 후측면 조사강도 @ 20°
- 새로운 1 개 혹은 3 개면 방향에 대해 32 개의 스펙트럼 밴드로 구분한 글로벌 조사강도

주요 과제 하나는 새로운 방향으로 장착한 - 수직 동-서 방향과 20°경사 설치 - 모듈의 후면에 대한 조사강도 값을 제공하는 것이다. 수평면 조사강도의 글로벌 및 직달 성분은 기존 데이터세트로 제공되지만 표준 전위 모델(Perez, Klucher, 혹은 기타)은 수직면에



대해 완벽하게 들어맞지 않는다. 경사지게 설치된 모듈의 후면에 대해서는 이들 모델이 전혀 맞지 않다.

따라서 양면형 태양광시스템의 수율 예측을 위해 각관계(view factor) 방법 혹은 광선 추적(ray tracing) 법이 사용되고 있다. 후자가 더 정확(컴퓨팅 시간 측면에서)하므로 IEC 61853-4 확대용으로 첫 시험 데이터세트를 만들기 위해 광선 추적법이 선택되었다.

단일 줄의 중앙에 설치된 태양광모듈의 각 셀을 대표하는 광선추적 계산법이 6 개의 일년 시계열(기후 지역 당 1개)과 많은 수의 센서 포인트들에 대해 수행되었다. 데이터세트의 일반적 검증을 유지하기 위해 이 스텝에서는 어떤 장착 구조도 고려되지 않았다. 그 다음, G_{FRONT} 과 G_{REAR} 의 최종값은 간편한 공간평균법(spatial averaging)으로 결정된다. 태양전지의 전기적 모델, 스트링 토폴로지와 바이패스 다이오드를 사용하면 더 현실적인 결과로 연결되지만, 이 절차를 하나의 특정 모듈 설계에만 제약시킬 수 있다. 모듈에 따라 음영과 조사강도의 불균질성을 다르게 처리하므로 그냥 평군하는 것이 확실하면서도 필요한 단순화이다.

이 보고서의 작성 도중에는 시험 데이터세트가 준비 중에 있었다. 여러 가지 조사강도 값의 통상적인 연간 합계는 표 17과 표 18에 주어져 있다.

분광 조사강도 데이터를, 특히 경사지게 설치된 모듈의 후면의 경우에 어떻게(혹은 할지 말지) 제공할지는 여전히 논의 중이다. 반사된 태양광의 분광 성분에 대한 발간자료들이 있으나[142-144], 기존 정보로부터 일반화된 절차를 유도하는 것은 어려워 보인다.

시험 단계에서는 기존의 분광 조사강도 데이터를 다른 방향의 표면에 대해 사용할 수 있다.

루프탑 시나리오용의 풍속 데이터의 준비 역시 논의 중이다. 추가적인 시간별 데이터나 혹은 기존값에 대한 보정 인자나 공식이 제공될 수 있을 것이다.

표 17: 고정 기울기로 설치된 경우 전면과 후면 연간 조사강도. BG_{OPT}는 모듈의 후면이 받은 추가적인 조사강도를 나타내는데, 전면 조사강도에 대한 비율로 표시되는 양면형의 광학적 이득이다.

#	위도	기후 지역	G _{HOR}	G _{FRONT}	G_{REAR}	BG _{OPT}
			kWh/m²	kWh/m²	kWh/m²	
1	01°00′S	적도 습한	1716	1669	448	0.27
2	33°30′ N	아열대 건조	2051	2311	497	0.21
3	33°22′ N	아열대 해안	1352	1476	344	0.23
4	56°00′ N	온대 해안	876	994	236	0.24
5	34°00′ N	고지대	1897	2157	473	0.22
6	57°00′ N	온대 대륙	1074	1287	282	0.22



표 18: 수직 동-서로 설치된 경우 전면과 후면 연간 조사강도. BG_{OPT}는 모듈의 후면이 받은 추가적인 조사강도를 나타내는데, 전면 조사강도에 대한 비율로 표시되는 양면형의 광학적 이득이다.

#	위도	기후 지역	G_{HOR}	G _{FRONT}	G_{REAR}	BG _{OPT}
			kWh/m²	kWh/m²	kWh/m²	
1	01°00′S	Tropical humid	1716	875	816	0.93
2	33°30′ N	Subtropical arid	2051	1203	1066	0.89
3	33°22′ N	Subtropical coastal	1352	701	710	1.01
4	56°00′ N	Temperate coastal	876	552	548	0.99
5	34°00′ N	High elevation	1897	1046	1057	1.01
		Temperate				
6	57°00′ N	continental	1074	687	659	0.96

4.7.5 결론

단면형 태양광모듈의 경우에 비해 양면형 모듈의 추가적인 수율은 여러 가지 태양광시스템 특성에 의존하는데, 단면형 모듈의 경우는 모듈 방향만이 두드러진 시스템 사양이다. 단면형 모듈의 에너지등급은 하나의 단일 모듈 방향(20°기울기에 적도 방향을 향함)에 제한되지만, 양면형 모듈의 에너지등급은 표준 설치조건이라 부르는 2 개의 단일 시스템 레이아웃에 제한된다. 이들 SMC 는 높은 알베도를 가진 지면에 설치되는 20° 기울기의 고정 시스템과 자연적인 알베도를 가진 지면 위에 수직으로 동-서 방향을 가진 시스템을 포함한다.

전체적인 접근법(모듈 특성분석 + 규격에서 곧바로 제공되는 G_{POA} 시계열을 사용한 단순 계산)은 전면과 후면 조사강도의 특정 시계열이 제공되는 한 양면형 모듈 에너지등급에도 적용 가능할 것이다. 따라서 규격의 일부분은 수정하거나 확대할 필요가 있다.

두 가지 SMC 에 대한 제약은 물론 엄격한 단순화가 요구된다는 의미이지만, 알베도, 높이 혹은 기울기 각도에 대한 양면형 이득의 의존성은 어떤 것이라도 고려될 수 없다. 후면 조사강도의 불균질성 역시 장착의 기하학적 구조와 랙킹(racking) 구조에 대한 의존성을 감안하더라도 전혀 고려되지 않고 있다.

이 접근방식에 따라, 기존 IEC 61853 시리즈 규격의 확장이 IEC TC 82에서 논의되고 있다. 공개된 수많은 이슈들이 여전히 해결되어야 하는데, 그 중에서 후면 입사각 정의 그리고 후면 조사강도의 분광 분포에 대한 일부 가정이 그 대상이다.

실제 양면형 태양광시스템 수율에서의 차이는 알베도, 장착 높이 그리고 지면 커버 비율 같은 단순한 환경과 설계 파라미터에 따라 동일한 태양광모듈의 경우에도 10 % 이상 발생할 수 있다. 해당 변화폭은 대부분의 모듈 브랜드와 유형에 따라 예상되는 성능(혹은 CSER) 차이보다 훨씬 더 크다. 그러므로 각 개별 수율 예측과 비교했을 때, 양면형 태양광모듈 에너지등급의 값은 단면형 태양광모듈의 값보다 덜 뚜렷할 수 있다.



5 새롭게 떠오르는 연구 분야들

5.1 BIPV 모듈의 특수한 작동조건

건물일체형 태양광(Building-integrated Photovoltaic: BIPV) 소자는 건축 재료겸 전기 생산 소자로서 양쪽의 사양을 충족시켜야 한다. 이런 근본적인 요구사항 외에 건물의 파사드 혹은 한 타운의 지붕에 들어가는 BIPV-모듈은 미적인 외관이 매우 중요한 역할을 한다[145]. IEA PVPS Task 15 "Enabling Framework for the Acceleration of BIPV"의 일환으로 기후에 따른 옥외시험 설비에서 동일한 유리-유리 BIPV 요소들의 성능을 비교하기 위한 공동 행동(특별한 유형의 라운드 로빈)에 착수하였는데, 유럽과 아시아 7 개국의 9개 참여기관이 라운드 로빈 공동 행동에 동의하였다[51]. 결정질실리콘 셀로 구성된 동일한 유리-유리 BIPV 요소들을 독일의 ertex solartechnik GmbH 가 제작하고, 이를 AIT(Austrian Institute of Technology GmbH)의 인증 시험소에서 사전 특성분석을 한 다음 9개의 옥외시험 사이트로 보내졌다. 하나의 모니터링 절차를 개발하여 모든 참여기관 사이에 동일하게 적용하였다[51]. 시험 스탠드의 건설에 필요한 요건은 기준 빌딩(통풍이 되는 커튼월, 콜드 파사드)의 파사드 배치에 기반하고 모든 기관들이 이를 감안하였다. 라운드 로빈 작업의 옥외 모니터링은 2017년 11월에 시작하여 2019년 말에 종료되었다. 동일한 모듈설계를 대상으로 합의된 모니터링 절차와 건설 요건을 적용함으로써 BIPV 요소들의 성능에 대한 지리적 조건과 기후조건의 영향을 분석할 수 있었다. 계산된 성능비는 기준 시험소에서 STC(AM1.5, 1000 W/m², 25°C)에서 설치 전과 후에 측정한 결과를 토대로 한다[52].

우선, 향후 추가 분석을 위해 모니터링 데이터는 병합, 처리 그리고 필터링하였다. 소프트웨어 도구로는 확보한 측정 데이터의 데이터베이스를 구축하는데 도움이 되는 MATLAB® 이 사용되었다. 가용한 측정 데이터의 분석은 다음 항목을 대상으로 수행하였다[52].

- 1) 옥외 시험 위치에서의 모듈온도와 면내 조사강도의 분포(빈도) (그림 73 참조)
- 2) 모니터된 모든 날의 시계열 일간 평균 성능비 계수(PR)
- 3) 시험 모듈마다 모든 날의 PR을 나타내는 박스 플롯에서의 중앙값과 사분위수
- 4) 주위와 모듈 온도의 비교
- 5) 모듈 온도와 조사강도 대비 조사된 모듈의 상대적인 수율을 보여주는 수율 매트릭스 플롯(그림 74 참조)
- 6) 시험 사이트에서의 시계열 월간 수율

일간 PR 계수는 kWh/m²/1 kW/m² (STC 조사강도 1 kW/m² 를 기준으로 사용) 단위의 특정 일조량 대비 kWh/kW (STC 에서 kW 단위 출력 등급) 단위의 특정 수율의 비로 계산된다. 만약, 일간 PR 값에 온도 보정이 적용되면 특정 수율값은 모듈온도 값과 상대적인 모듈 출력 온도계수 -0.37 %/℃를 사용하여 보정한다.





그림 73: 옥외 시험 위치에서 약 50 W/m² 에서 시작하여 50 W/m² 구간마다 측정한 모듈 온도(상단) 그리고 면내 조사강도(하단)의 분포.

조사강도 외에 온도는 모듈 성능 측면에서 가장 중요한 인자 중 하나이다. 그림 74에서는 기후별로 측정된 모듈온도 T_M의 분포와 어레이면의 조사강도 G_{POA} 측정결과를 비교하였다.

129





구간 5°C/50 W/m² (Source: [52]).

그림 74 는 모듈 온도와 조사강도에 따라 조사한 모듈의 상대적인 수율을 나타낸 것이다. 각 빈의 컬러는 하나의 빈 내에서의 수율을 총 수율로 나눈 상대적인 수율을 나타낸다. 모든 빈들의 합계는 12개월 기간의 총 수율 100 %를 나타낸다. 이들 매트릭스 플롯으로부터 모듈의 작동조건뿐 아니라 기후에 대한 정보를 얻을 수 있다. 물론 이들 매트릭스 역시 측정 데이터의 가용성에 의존한다. 6개의 모듈 중 5개는 조사강도 800~950 W/m² 에서 상대적인 수율의 피크를 나타내는데, 온도는 45~55 °C 범위인 것을



관찰할 수 있다. 수직으로 경사지게 그리고 남향으로 설치한 시험 모듈은 10월부터 3월까지는 어레이면의 조사강도가 높고, 여름 동안의 조사량은 상당히 낮다. 그러므로 햇빛이 좋은 남쪽 지역에 설치된 일부 모듈은 400~600 W/m² 의 조사강도와 1차 피크와 동일 온도 수준에서 상대적인 수율의 2차 피크를 보여준다. 약 900 W/m² 에서의 첫 번째 피크는 연중 추운 기간에 발생하는 반면, 다른 피크는 여름철과 관련된다는 결론에 이르게한다. 두 피크가 발생한 것은 각 지역에서의 기후에 의존한다. 햇빛이 좋은 겨울 해당 달에는 크게 두드러진 상부 피크가 발생하는 반면, 겨울에 흐린 조건은 여름 철의 피크를 강조한다. 모듈 M17_02288_NED 은 2 번째 피크를 보여주지 않는데(비록 라운드 로빈 전 기간 동안 그 데이터 가용성은 높지만), 그 이유는 네덜란드에 있는 시험 사이트가 이 연구에서는 가장 북쪽에 위치하기 때문이다. 네덜란드는 '온대 해안(Temperate Coastal)' 기후 (Cfb)로 일반적인 추운 겨울은 없다. 지난 겨울(이 연구의 측정 기간 중)은 심지어 보통때보다 더 따뜻하였다[52].

다음 스텝에서는 기후와 무관한 BIPV 모듈용의 핵심 성능 지수(Key Performance Indicator): KPI)를 정의하였다[146]. 이 역시 IEC 61853 규격의 목표이므로, IEC 61853 규격으로부터 비롯된 P_{mpp}-매트릭스(G_{POA} 와 T_{mod} 의 함수로)를 토대로 한 접근법이 사용되었다. BIPV 모듈 성능에 대한 상세 연구에서 기술한 바와 같이[50], 이 P_{mpp}-매트릭스를 확장한 몇 가지 방식이 매우 소중할 수 있다. 이 접근법이 Task 15의 BIPV 모듈 시험 라운드 로빈의 모니터링 데이터 분석용으로 적용되었다. 각 사이트별로 최소한 5분(일부 사이트에서는 더 길수도)의 시간 해상도를 가진 7개 시험 사이트에 대하여 일 년 이상 기간의 옥외 모니터링 데이터로 구성된 Task 15 라운드 로빈의 데이터세트중 가장 좋은 것을 추출하기 위해 모범사례(best practices)를 채택하였다. 이는, 전세계 사이트에 대해 합의된 방법으로 분배되고 모니터링한 동일한 시리즈(동일하게 제조)의 BIPV 모듈을 대상으로 수행된 최초의 IEC 61853 G-T 출력 매트릭스이다. 그리고 이들 모듈들은 시험 사이트로 보내기 전에 동일한 옥내 시험소에서 광범위하게 분석(I-V, EL 등)되었고 옥외시험이 끝난 후에는 열화, 오염, 광조사와 같은 모듈 상태에서의 특정 변화도 확인할 수 있었다[146].

5.2 컬러 태양광모듈의 성능

더 좋은 미관 덕분에 부가가치가 올라가면서 점점 더 많은 컬러 모듈이 시장에 진입하고 있다. 컬러 BIPV 모듈과 제품에 대한 최신 개요는 IEA PVPS Task 15의 기술 보고서에서 찾을 수 있다[147]. 보고서는 다양한 컬러링 기술, 이론적 배경과 실험 결과에 대한 내용도 제공하고 있다. 그림 75는 전형적 컬러 모듈의 사례들을 보여주고 있다.





그림 75: 서로 다른 제조업체에서와 R&D 프로젝트로부터의 컬러 태양광모듈의 상세 사진 모음(위: Smart-Flex [148], PV Construct [149], 아래: Sunage [150], Hochschule Luzern) [151].

모듈의 컬러링은 다양한 테크닉들(예를 들어, 특수 반사방지 코팅, 컬러 태양전지층, 봉지재 혹은 백시트, 분광 선택성 유리 코팅이나 포일, 유리의 디지털 혹은 스크린 프린트, 유리 샌드블래스팅, 유리 위에 미네랄 코팅 혹은 에나멜)을 통해 얻을 수 있다. 모든 테크닉은 분광응답의 변화를 가져오고, 이것이 단락전류의 감소와 STC 출력의 감소로 이어진다. 컬러에 의해 발생한 성능손실은 제품의 주문사양(층의 위치, 컬러들, 균일성, 투명도와 불투명도)에 따라 크게 변한다. 문헌에 의하면 효율 손실이 5~50 % 범위에 이른다[152-155]. 그러나 에너지등급에 대해 논할 경우, 모듈의 다른 파라미터들 역시 미적인 변화에 의해 영향을 받을 수 있다는 점이 고려되어야 한다. 통상적으로 영향을 받는 다른 파라미터는 NMOT 시험으로 측정한 작동온도와 입사각 응답이다. 온도계수는 셀 소재의 특성에 의해 주어지므로 컬러에 의해 영향을 받지 않는다. 컬러 모듈 개발자들의 핵심 난제는 심미적인 요건과 컬러 태양광모듈의 효율과 에너지 산출량 그리고 컬러 태양광모듈의 에너지수율 예측/모델링 사이의 균형을 잡는 것이다.

실제 작동조건 하에서의 성능을 더 잘 이해하기 위해서는 동일한 자재명세서(bill of materials; BOM)와 컬러 처리를 하지 않은 모듈 구조를 가진 기준 모듈을 컬러 모듈과 함께 모니터하여야 한다. SUPSI PVLab 은 7개의 컬러 모듈 프로토타입에 대한 일년간의 측정 캠페인의 첫 결과를 소개하였다[156]. 그림 76은 스위스 Lugano 소재 SUPSI 에 설치된 옥외시험 설비를 보여주고 있다. 시험 대상인 모듈의 컬러들은 담백한 컬러와 다중 컬러 소자를 포함하여 적색/테라코타로부터 백색/회색에까지 이른다. 셀의 가림(camouflage 혹은 셀의 가시성)은 모듈 내에서도 상당히 변화가 크다. 양면형 모듈과 깊게 텍스쳐 처리한 유리를 가진 모듈도 역시 포함되어 있다.





그림 76: 일부 기준 모듈과 함께 컬러 모듈을 갖춘 옥외시험 스탠드 사진(Source:[156]). 왼쪽 위로부터 오른쪽으로: 직물(textile) 모듈(양면형), 스위스 캔톤의 깃발들, 깊게 텍스쳐 처리한 파사드 모듈, 기준을 가진 테라코타 모듈, 기준을 가진 백색 모듈 그리고 기준을 가진 회색 모듈.

각 컬러 모듈의 에너지생산을 특정 비컬러/투명 기준 모듈의 수율과 비교하였다. 직물 스타일, 캔톤 깃발 그리고 깊게 텍스쳐 처리한 파사드 모듈의 경우에는 원래 동일한 BOM 을 가진 기준 모듈이 없기 때문에, 그 대신 동일한 셀 기술의 상업용 모듈이 사용되었다. 직물 스타일의 양면형 모듈을 동일한 셀 기술(HJT)과 유사한 전면 셀 효율을 가진 단면형 모듈과 비교하였다. 상업용 기준 모듈은 직렬연결 셀의 개수가 다르므로 직접적인 kWh 상호비교는 측정된 kWh 값을 모듈의 활성 면적(직렬연결 셀의 개수 * 셀 면적)에 정규화시킨 후에 하여야 한다.

그림 77은 일년간 생산된 에너지 kWh 를 상호 비교한 결과인데, (1) 면적에 따른 수율 [kWh/m²]로 모듈 원래 컬러의 바로 표시되어 있고, (2) 에너지를 옥내측정 STC 출력에 정규화시켜 얻은 STC 출력에 따른 수율[kWh/W]로, 그림에서 오렌지색 바로 표시되어 있다.



그림 77: 컬러 모듈과 투명한 기준 모듈 사이의 연간 생산 kWh 상호 비교. 오렌지색 바는 모듈 활성 면적[kWh/m²]에 정규화시킨 것이고, 원래 모듈 색으로 표시된 바는 측정된 STC 출력[kWh/W_p]에 정규화시킨 것이다.



기술(컬러의 유형과 균일도 그리고 셀 가림의 수준)에 따라 컬러 모듈은 기준 모듈에 비해 16~45 % 더 적은 에너지(kWh/m²)를 생산한다. 그 차이는 옥내의 제어 조건에서 측정한 에너지등급으로부터 추정할 수 있는 손실 혹은 이득의 합계이다. 모든 모듈은 옥외시험 설비에 설치되기 이전에 반드시 특성분석이 되어야 하는데, 가장 중요한 시험 은 STC 출력 측정과 분광응답의 순이다.

실험실에서의 측정 결과, 컬러 모듈의 STC 출력이 감소하는 것은 분광응답과 그에 따른 단락전류의 손실과 연관된다는 것을 보여주었는데, 단락전류는 컬러 모듈과 기준 모듈의 분광응답 SR 곡선을 적분하여 얻는다. 컬러가 분광응답에 미치는 영향은 그림 78a 에 나타나 있다. STC 에서 측정한 단락전류 I_{sc} 의 손실은 (1) 셀들이 코팅 뒤에 있어 완전히 가려진 경우와 (2) 빛의 대부분을 반사시키는 모듈에서 가장 높다. 백색 모듈과 깊게 텍스쳐된 유리를 사용한 테라코타 모듈이 그러한 경우이다(그림 76 참조). 기준 모듈 대비 성능 차이가 가장 작은 것은 테라코타 모듈로, 코팅이 아주 얇아 셀들이 육안으로 확인된다. 측정된 단락전류의 손실은 전부 다는 아니지만 그림 77에 보이는 kWh/m² 손실의 대부분을 잘 설명한다.

컬러에 의해 발생하는 2차 영향이 그림 77에서처럼 생산된 kWh 를 측정된 STC 출력으로 정규화할 때 나타난다. 기준 모듈 대비한 kWh/W_p 차이는 9.5 %의 이득부터 5.5 %의 손실까지이다. 모듈의 작동온도, 일간과 계간 분광 변화에 대한 응답 그리고 각도 응답 혹은 양면형 셀 사용에 따른 조사강도 이득과 같은 2차 영향들이 이들 수치를 결정하는데, 이는 IEC 61853 Part 1 과 Part 2에 따른 컬러 모듈의 완전한 특성분석의 필요성을 강조하는 것이다.

직물 모듈(기준 모듈 대비 9.5 % kWh/W_p 이득)의 사례는 양면형 셀의 사용이 어떻게 전면 컬러 프린팅에 의한 효율 손실을 부분적으로 보상하는 해결책이 될 수 있는지를 보여준다. 완전히 투명한 모듈의 후면은 양면형 인자 > 1의 결과로 이어진다. 컬러에 의해 발생한 손실 대비 양면형의 이득은 동일한 BOM 을 가진 기준 모듈이 없어 정확한 정량화가 가능하지 않다.

백색 모듈(기준 모듈 대비 4.8 % kWh/W_p 이득)인 경우, STC 효율 손실의 부분적 보상은 분광 선택성 포일 때문으로 간주되는데, 이는 가시광 스펙트럼을 반사하고 확산하는 반면에 적외선은 투과시켜 전류생성에 기여하게 하는 장점을 가지고 있다. I_{sc} 의 큰 손실에도 불구하고, 한쪽에서는 포일이 작동온도를 최고 10℃ 까지 낮추고(그림 78b 참조), 다른 쪽에서는 낮 시간의 분광 불일치를 낮춰준다. 정도가 크지는 않지만 동일한 영향이 밝은 회색 모듈에서 보인다.

다른 모듈들은 열적 및 분광 손실 때문에 kWh/W_p 성능에 미치는 컬러링의 영향이 -3.9~-5.5 %의 네거티브 값을 보여준다. 적색 파사드 모듈은 매우 두꺼운 유리 구조로 인하여 셀 온도가 가장 높게 나타난다.





다중 컬러 모듈에서는 설계된 패턴으로부터의 발생 가능한 불일치 영향 때문에 성능 상의 추가적인 차이가 예상된다. 대상 모듈의 측정에서 완전히 다른 패턴과 컬러(동일 제조업체가 만든 2 개 모듈은 스위스 캔톤 깃발을 나타냄)에도 불구하고 성능에서의 상대적인 차이는 겨우 5 %에 불과한 것으로 확인되었다. 예술적 디자인에 대한 세심한 계획이 모듈의 불일치 손실을 최소화하는 핵심 요소로 확인되었다.

5.3 에너지등급의 불확도

IEC 61853-3[5]에 기술한 에너지등급 방법론과 관련하여 검색된 "기후 특성에 따른 에너지등급(*CSER*)" 파라미터는 다른 어떤 추정된 값과 마찬가지로, 사용된 입력데이터 결정에서 발생 가능한 오류(시스템적 그리고 무작위)와 적용된 계산 모델 자체의 오류로부터 유래하는 불확도를 가진다.

IEC 61853 규격의 Part 1[3]과 2[4]는 Part 3[5]에서 기술한 모델이 요구하는 입력데이터를 얻기 위한 절차를 정의하고 있고, 그리고 온도, 조사강도 거동 혹은 분광응답 같은 태양광 소자의 다양한 특성분석을 설명하고 있다. 처음 두 문서에 규정된 바와 같이, 매 성능 시험마다 하나의 보고서가 작성되어야 하는데, 그 중에 포함되어야 할 상세내용의 하나가 "교정과 시험결과의 추정 불확도에 대한 명세서(a statement of the estimated uncertainty of the calibration and test result (where relevant)"이다. 마찬가지로 Part 3에서는 에너지등급에 대한 결과 보고서가 작성된다. 여기에는 다른 정보 중에서 "에너지등급 결과의 추정 불확도에 대한 명세서(a statement of the estimated uncertainty of the energy rating results)"가 포함된다.

CSER 추정에 필요한 입력데이터와 관련하여 소자 사이의 성능 차이에 기여하는 주요 인자 중 하나는 출력 매트릭스 측정을 토대로 하여 모델링된 조사강도 의존성이다[11, 13, 107]. 그러므로 이들 측정에서의 불확도를 줄이는 것이 아주 중요한데, 이는 Part 1에 나열된 일련의 규범적인 기준에 정의된 조건들을 추종함으로써 가능할 수 있다. 각 측정은 불확도를 가질 수밖에 없는데, 적용된 조사강도의 수준과 온도, 측정 장치 및 절차 등에 의존한다. 이런 종류의 출력 측정을 수행하는 시험소들은 각 측정에 대해 불확도를 분명히 밝히고 있는데[107, 157], 특정 장치에 따라 더 큰 혹은 더 작은 정도로 불확도에 영향이 미치게 된다. 예를 들어, 조사강도 수준 결정용으로 기준 태양전지를 교정할 때의 오차는 모든 측정에 존재한다.

성능 매트릭스 외에 에너지등급 분석에서 또 다른 중요한 불확도의 요인은 태양광모듈의 온도를 추정하고 조사강도, 주위온도와 풍속의 함수로 열적 성능을 시뮬레이션하는데



사용되는 두 가지 계수(u₀ 와 u₁)를 계산하는데 필요한 측정으로부터 발생한다[107]. Part 2에 기술된 이들 파라미터를 정의하는데 필요한 실험실 장치는 이어지는 측정 오차의 가능성 때문에 이행하기 어렵다. 현재, IEC Technical Committee 82는 IEC 61853 규격 Part 2의 첫 수정 작업을 진행 중인데, 두 가지 열적 파라미터 결정에서의 변화도 포함될 수 있을 것이다.

CSER 추정에 필요한 또 다른 입력데이터는 입사각 영향으로 기인하는 조사강도 보정용으로 사용되는 *a*, 파라미터이다. 이 경험적인 계수는 광원과 모듈면의 법선 사이의 입사각을 달리하여 조사했을 때 태양광소자의 단락전류 측정으로부터 계산할 수 있다. 이들 측정은, 특히 높은 입사각에서는 측정 장치와 소자 구조(반사방지 코팅, 텍스쳐 유리 혹은 표준 유리)로부터 발생하는 소자 고유의 응답과 관련되는 오류를 벗어날 수 없다. 입사각이 50°를 넘으면 측정 불확도가 상당하다. 다양한 실리콘 기반 모듈의 경우, 70°와 80°에서 측정된 변동폭은 각각 1.5 %와 2.4 %에 이른다[118]. 게다가, *a*, 세팅 확인 결정을 기술한 규격 Part 2는 *a*, 값을 계산하기 위해 실험 데이터에 적용할 피팅 절차를 특정적으로 보여주지 않는데, *a*, 값은 사용된 절차에 따라 결과가 달라진다.

IEC 61853-3 방법에 적용된 분광 보정은 분광응답 값을 사용하는데, 이 값은 IEC 60904-8 [112]에 기술된 절차에 의거하여 얻어야 한다. 그래서 이 역시도 불확도를 벗어날 수 없다. 예를 들어, [13]에 적용된 세팅은 분광응답 측정의 미가공 데이터에서 3.38 %의 불확도를 가진다. 그러나 분광 불일치 인자 추정에서의 불확도 기여도는 0.124 %이다. 이것 외에도, 기준 기후 데이터세트(IEC 61853-4 [6])에 제공된 분광 조사강도 데이터는 밴드 폭이 다르게 통합되어 있기 때문에 분광 보정 계수의 추정에 추가적인 스텝을 필요로 하게 된다. 이들 29밴드 각각에 대해 분광응답 값이 계산되어야 하고 Part 3 는 문헌 [112]에 따라 작은 파장 스텝별로 측정한 태양광 소자의 분광응답 데이터로부터 이들 독립적인 값을 어떻게 추정하는지 확실하게 기술하고 있지는 않다.

태양 일조량 데이터와 Part 4에 제공된 주위온도와 풍속 같은 기후 변수들과 관련하여, IEC 61853-3에서 사용된 입력데이터는 고정된 기준 데이터세트이므로 불확도에 기여하는 것으로 고려하지 않는다. 태양에너지 자원 데이터와 기후 변수들의 정확도는 태양광소자 관련 데이터의 정확성이 더 중요한 에너지등급 분석에서 보다는 예상되는 에너지수율의 정확한 추정에 더 중요하다. 그 결과로, 에너지등급 계산의 정확도는 태양광모듈 측정에서의 불확도에 의해 제한되는데, 왜냐하면 방법론과 데이터세트가 미리 정의되어 있고 규격화되어 있기 때문이다[13].

다양한 입력 데이터에서의 불확도가 어떻게 에너지등급 절차의 다양한 스텝을 통해 최종 *CSER* 값에 전파되는지는 IEC 61853 규격에 아직 정의도 정량화도 되어 있지 않다.

입력 데이터의 불확도가 에너지등급 추정에 미치는 영향을 정량화한 여러 연구결과가 발표되어 있다[11, 13, 157]. 출력 매트릭스 측정에서 불확도의 요인은 문헌 [157]에 기술되어 있고, 문헌 [11, 157]에 분석되어 있는데, 에너지등급 추정 방법은 IEC 61853-3에 정의된 것과는 다르다. 저자들은 STC 출력값의 중요성을 강조하는데, 이 값은 흔히 고정값이 아니고 빛과 온도 노출에 의존할 수 있다[118]. STC 출력의 불확도는 기술에 따라 1.1~2 % 사이에서 변하는데, 저자들은 최종 에너지등급 추정의 불확도에 가장 중요한 기여를 하는 것이 기술이라고 보고 있다. 성능 추정에서의 불확도는 STC 출력 추정을 포함하여 1.8~3 % 범위이다[11]. 측정 불확도는 흔히 측정 대상의 상태에 의존하는데, 통상적으로 측정은 STC 에 최적화되어 있다. 그 결과, 문헌 [107, 118, 157]에 반영된 바와 같이, IEC 61853-1의 출력 매트릭스에서 다른 포인트들의 측정이 더 높은 불확도 값을 나타낼 수 있다. 1.3~3.5 % 범위에 있는 출력 매트릭스 데이터에서의 공표된



불확도가 최종 에너지등급 값에서는 다양한 출력 측정 사이에 가정된 상호연관성의 수준에 따라 1.32~4.5 % 범위의 불확도를 가져올 수 있다. 여기서, 상호연관성은 측정 사이에 완전한 독립에서부터 완전한 상호연관성이 있다고 보는 최악의 시나리오까지의 범위를 가진다[157]. 입력데이터와 출력 산출량 추정 양쪽 모두에 대한 완전한 불확도 분석이 에너지등급 추정용의 IEC 61853-3 방법에 따라 문헌 [107]에 소개되어 있다. *CSER* 파라미터에 대해 추정된 최종 평균 불확도는 1.9 %인데, 이는 연간 에너지 산출량의 추정 불확도 2.2 % 그리고 STC 출력에서의 불확도 1.9 %와 관련이 된다. 저자들은 가장 중요한 오류의 요인은 출력 매트릭스에서의 조사강도 측정과 2 개의 파라미터 u_0 와 u_1 의 결정이라고 결론 내리고 있다.

입력데이터에서의 불확도 외에 IEC 61853-3 방법론에 통합된 모델은 본질적인 특성 때문에 모든 태양광기술에 대해 그 정확도가 동일하지 않을 수 있다. 예를 들어, 입사각 분석용으로 적용된 모델은 단락전류 측정을 다양한 입사각에 맞춰 조정하기 위해 수학적 표현을 사용하는데, 이는 높은 입사각에서의 데이터를 피팅하기에는 그 정확도가 충분하지 않고, 소자에 따라 거동이 달라질 수 있다. 모델은 반사방지 코팅, 텍스쳐 처리한 유리 혹은 표준 유리를 사용함에 따라 광학적 특성이 달라지는 소자들의 거동을 동일한 정도로 나타낼 수는 없다. 표면 유형의 차이가 성능에 미치는 영향은 문헌 [14]의 Part 3에 정의된 것과는 다른 모델을 사용하여 정량화되어 있다. 게다가, 확산 조사강도의 등방성 분포의 가정은 가용한 실제 태양에너지 자원을 단순화한 것이다.

마찬가지로, 태양광모듈의 작동온도를 추정하는데 사용하는 모델은 모듈의 봉지재나 구조가 달라질 경우에는 모듈 열용량, 열적 과도상태(thermal transients), 모듈을 가로지르는 온도 구배, 그리고 소자 위에서 일어나는 복사 열전달과 연관된 열적 거동을 반영하지 못할 수 있다.

출력 산출량을 추정하기 위해서는 Part 1에 정의된 출력 매트릭스의 측정에 내삽과 외삽을 적용할 필요가 있다. 그러나 문헌 [157]에서 규정한 바와 같이 서로 상호연관성이 없는 한 내삽한 값의 불확도가 측정 포인트들의 불확도보다 더 작을 수 있다. Part 3는 이중 선형 내삽과 외삽을 어떻게 적용하는지를 기술하는 일련의 방정식을 포함하고 있다. 그럼에도 불구하고, 모든 가능한 상황(가용한 면내 조사강도와 모듈 작동온도에 의해 정의된)에 대해 충분히 상세히 기술되어 있지는 않은데, 이는 상황에 따라 달리 이행될 수 있기 때문이다.

주로 낮은 조사강도 조건으로 특징되는 어떤 상황 하에서 명확성이 부족한 것에 더하여, 에너지등급 규격에 사용된 이중 선형 내삽과 외삽은 상당한 정도의 비선형성과 함께 실제 기술의 거동과는 편차를 보일 수 있다. 특히 기준 기후의 일부에서 많이 나타나는 낮은 조사강도에서는 이런 것이 출력 산출량 추정에 불리할 수도 혹은 이로울 수도 있다. 그러나 낮은 조사강도 수준에서의 편차는 에너지등급 규격에서 분석된 만 일년 기간에 걸친 에너지생산의 측면에서 볼 때는 적절하지 않는 것으로 간주될 수 있다. 게다가, 낮은 조사강도 수준에서 비선형성을 고려한 것이 선형성의 것과 매우 유사한 결과를 제공하였기 때문에 추가적으로 복잡한 것들은 필요하지 않을 수 있다[104].

다양한 내삽 방법들이 분석되었는데[107], IEC 61853에서 사용한 것이 가장 낮은 바이어스를 나타낸다. 게다가, 저자들은 적용된 내삽 방법으로부터 유래한 오류와 바이어스는 완전한 에너지등급 추정에 사용된 입력데이터로부터 유래한 불확도보다 훨씬 더 낮다는 결론을 내렸다. 출력 매트릭스 측정 동안에 미치는 더 큰 영향은 열적 파라미터와 조사강도 측정에 의한 것이다. 불확도에 관한 기술에서 우리는 항상 two sigma 값의 확대를 고려하고 있다.



5.4 태양광시스템의 대표적인 메타데이터 분석

보급 초기 시절에 태양광시스템은 비용 관점에서 최적 조건 하에 설치되었는데, 남향(북반구) 혹은 북향(남반구)에 해당 위치의 위도보다 약간 더 낮은 기울기로 설치하는 것이 전부였다[158, 159]. 이런 방식으로 설치된 kW_p 당 연간 최대 비산출량(specific yield) kWh/kW_p 를 달성할 수 있었다. Task 13 전문가들의 초기 작업은 다양한 국가(유럽, 미국, 오스트레일리아)의 연간 비산출량의 분석에 초점을 두고 있었고, 연간 비산출량은 조사강도가 높을수록 더 높고, 반면에 시스템 성능비는 주위온도와 네거티브한 상관관계를 갖는다고 보고하였다[160]. 인터넷 웹 스크래핑에 기반하여 확보한 네덜란드, 독일, 벨기에, 프랑스 및 이탈리아에 있는 약 20,000 개 시스템을 업데이트한 데이터세트의 가시화 작업 결과는 위도가 내려갈수록 연간 비산출량이 더 커진다는 것을 보여주었다[161]. 유사한 결과는 프랑스[162]와 벨기에[163]에서도 보고되었다. 이들 연구는 연간 비산출량에 대해 지리적으로 평균값 혹은 중앙값을 보여주지만[161], 일부는 관찰한 값들의 분포에 대해 함수 피팅을 시도한다[162, 163]. 이들 결과와는 무관하게 실제 시스템이 한 국가나 혹은 지역에 설치된 태양광시스템을 얼마나 대표할 수 있는지는 미지수인데, 데이터세트는 루프 장착 시스템만을 혹은 지상 설치 시스템 아니면 둘을 혼합한 것을 포함할 수 있다.

태양광시스템 비용이 크게 하락함에 따라 최적이 아닌 방위각과 경사각의 지역에서도 경제적으로 매력적일 것이라고 예상할 수 있다. 실제로 현장 설치 시스템[164], 특히 주택용 시스템에서 변화가 관찰되었는데, 방위각과 경사각의 변화는 시스템이 설치되는 특정 빌딩에 고유한 것이다. 그러나 이런 도시 환경에서는 다양한 루프 요소들과 이웃 건물의 음영 때문에 성능비와 연간 비산출량이 낮아질 것이다. 네덜란드의 도시와 농촌 환경 사이의 수율을 비교하는 최근 연구는 최적이 아닌 방위각과 경사각을 감안한 성능비가 실제로 도시 여건에서 더 낮다는 것을 보여준다[165].

연간 수율 데이터를 찾기 보다는 태양광시스템 메타데이터(모듈의 경사각과 방위각, 설치 용량)를 확보하고, 지역적으로 구분된 그 데이터의 대표적인 분포를 사용하고, 매년 변화하는 기상 정보(조사강도, 주위 온도)를 기반으로 연간 비산출량 분포를 계산할 것을 제안하고 있다[166]. 메타데이터(경사각, 방위각, 설치용량과 연간 비산출량)뿐 아니라 가능한 많은 성능 데이터를 수집하고 처리하고자 하는 공동 노력의 일환으로 Killinger 등은 총 용량 59 GWp (2018년 전세계 설치용량의 14. 8%)에 이르는 유럽, 미국, 일본, 오스트레일리아에 위치한 거의 3백만개 태양광시스템으로부터 메타데이터를 수집하였다[167, 168]. 이들 데이터들은 시스템 규모에 따라 2 가지(25 kW 이상과 이하) 클러스터로 각 국가별로 분류되었다. 하나의 클러스터에 있는 각 메타데이터는 하나의 분포 함수로 근사화시켰다. 선택된 13개 함수들에 가장 피팅이 잘되는 것을 토대로 하여 Weibull 같은 하나의 특정 분포함수를 찾았다[169].

표 19 와 그림 79에서와 같이 주로 주택용인 25 kWp 이하 시스템에서의 결과는 모든 클러스터에 걸쳐 공통성을 보여준다. 평균 경사각은 16.1도(오스트레일리아)와 35.6 도(벨기에) 사이이고, 연간 평균 비산출량 값은 786 kWh/kWp(덴마크)에서 1426 kWh/kWp(미국 남부) 사이이다. 용량의 중앙값이 가장 작은 지역은 영국(2.94 kWp)이고, 가장 큰 곳은 독일(8.96 kWp)이다. 거의 모든 국가들은 적도를 향한 방향의 평균 방위각을 가졌다.

그림 79은 피팅에 최적인 분포 함수로 피팅된 모든 수집된 메타데이터를 보여준다. 25 kWp 이상 시스템에 대한 데이터는 유사한 분포를 보여주는데, 평균 경사각은 25 kWp



이하 시스템에 비해 더 크고 비산출량도 더 큰데, 이는 시스템이 클수록 최적조건을 감안한 것이라는 증거이다[167, 168].

국가	방위각 (degrees) (평균)	경사각 (degrees) (평균)	용량 (kWp) (중앙)	비산출량 (kWh/kWp) (평균)
오스트레일리아	8.58	16.1	5.00	-
오스트리아	-0.34	31.1	5.15	1040
벨기에	-1.69	35.6	5.20	922
덴마크	0.48	30.0	6.00	786
프랑스	-0.28	28.7	2.96	1101
이탈리아	-15.9	19.8	5.88	1142
일본	-1.20	23.8	4.92	1222
네덜란드	0.77	32.5	3.30	855
영국	-1.07	31.8	2.94	897
미국 북부	0.42	25.2	5.81	1005
미국 남부	9.33	19.9	5.26	1426

표 19: 각 메타데이터 파라미터별로 여러 국가에서 확보한 전체 데이터세트로부터 추출한 평균 혹은 중앙값 (adapted from Source [168]).





그림 79: 클러스터(열)와 파라미터(행) 별로 근사화 확률 분포(선)를 가진 실제 데이터(바)의 히스토그램. 여기서, 용량은 설치용량 그리고 수율은 연간 비산출량이다. 여기에 보고된 모든 시스템은 용량이 25 kW_p 이하이다. 각각의 축 내에서 피팅이 가장 잘된 분포 유형의 이름, 피팅한 확률밀도분포(probability density distribution) 대비 히스토그램에서 실제 데이터 산란 사이의 평균 제곱근 오차(root mean squared error: RMSE), 각 클러스터별로 고려된 데이터 포인트의 개수(n), 그리고 선형회귀(linear regression)의 Pearson 상관관계 계수(ρ) 가 보고되어 있다. 수율에 대해 ρ 대신에 평균값 μ 이 제시되어 있다. 모든 y-축들은 굵게 적색으로 나타낸 값이 개별 축에 지정된 것을 제외하고는 0 %와 50 % 사이의 확률로 눈금이 되어 있다 (Source: [168], reproduced with permission from Elsevier).

방위각 데이터는 하나의 로지스틱 확률분포함수에 의해 거의 모든 국가의 경우에서 가장 피팅이 잘 되는데, 경사각, 용량과 연간 수율에 대해서는 그런 대응이 확인되지 않는다. 경사각 분포는 7개의 분포 유형별로 크게 다른 것을 볼 수 있다. 경사각은 위도와 함께 약간씩 증가한다. 지붕의 물리적인 각도가 태양광시스템의 경사각을 좌우하는 반면에 평평한 지붕에서는 바람의 힘을 약화시키기 위해 경사각을 통상적으로 낮게 유지한다. 흥미롭게도 벨기에와 네덜란드는 유사한 기후와 위도를 공유함에도 경사각 분포는 다른데, 이는 건축측면에서 지붕의 스타일이 다르기 때문으로 보인다. 설치된 용량의 분포에서 평균 용량은 유사하다. 프랑스의 경우는 피크가 3 kWp 로 확실한 편차를 보여주는데, 이는 규제 때문이었다[162]. 연간 비산출량 데이터의 히스토그램은 다른 메타데이터보다 훨씬 더 매끄러운데, 이는 시료 크기가 더 크고 데이터 보고에 오류가 잘 일어날 수 있는 인력 동원의 수동방식이 아닌 데이터의 디지털 기록 때문이다. 연간 평균 수율의 결과는 훨씬 이전에 보고한 것과 유사하지만 차이점도 관찰되는데, 대부분 데이터세트에서의 대표성 차이에 관련되는 것으로 추측된다.



방위각, 경사 및 용량에 대한 한 세트의 대표성 있는 분포를 설정하였으므로, 이들을 Saint-Drenan 등이 제안한 것과 같이 지역 혹은 국가의 태양광 전원 모델링 접근법에 사용할 수 있을 것이다[166]. Killinger 등은 특정 클러스터에서 시스템 포트폴리오 중에 원하는 메타데이터를 무작위로 샘플링하는데 피팅된 분포를 사용할 것을 제안하고 있다[167]. 보고된 분포 함수는 일반적으로 사용되어서는 안되고 오직 특정 클러스터만을 위해서 혹은 유사한 기후, 위도 그리고 지원 정책 혹은 보조금이 있지만 여기서 분석되지 않은 클러스터를 위해 사용되어야 한다. 이를 실증하기 위해 독일에서 25 kWp 미만의 태양광 발전 정책은 분포를 토대로 하여 다음과 같이 도출되었다.

첫 번째, 모든 태양광시스템의 설치용량, 지리적 위치와 연간 비산출량이 알려져 있으므로, 만약 누군가가 실제 산출량을 원하면 비록 이론적으로는 대상이 될 수 있겠지만 그 시스템은 대상이 되어서는 안 된다.

두 번째, 피팅된 분포를 샘플링하여 각 태양광시스템에 대해 경사와 방위각을 그 시스템에 할당한다. 방위각에 대해서는 위치 계수 -0.1366, 그리고 스케일 파라미터 23.0048을 가지고 로지스틱 분포가 사용되고 경사에 대해서는 평균값 38.0648, 표준편차 9.6547을 가지고 극단값 분포(extreme value distribution)가 사용된다[168]. 용량은 시스템의 실제 용량이 될 수 있고 아니면 분포로부터 취할 수 있다(이 경우에는 파라미터로 shape 0.1143, scale 3.5745, 그리고 location 6.2413을 가지고 극단값 분포가 사용된다).

세 번째, 각 태양광시스템에서 에너지수율은 적절한 모델, 지리적 위치 그리고 기상 데이터를 사용하여 시뮬레이션할 수 있다. 독일에서 생산된 태양광 에너지는 모든 시스템으로부터 시뮬레이션된 에너지를 집계하여 도출할 수 있다. 만약, 태양광시스템의 개수가 너무 많으면 무작위로 태양광시스템을 선택하는 방식도 사용할 수 있고 컴퓨터 계산 노력을 제한하기 위해 그 결과를 업스케일한다. 에너지수율의 시뮬레이션보다는 수집되어 피팅된 실제 수율이 사용될 수 있다. 그러나 에너지수율은 하나의 산출값으로, 이는 고정적인 메타데이터와 역동적인 기상 데이터를 토대로 한 것이다. 또한, 일간 혹은 월간 에너지생산을 계산하고자 한다면 유일한 시뮬레이션 가능성은 메타데이터 분포 함수를 기반으로 하는 것이다. 여기서, 성능비의 사용 혹은 그 보다는 클러스터마다 연간 비산출량으로부터 도출된 성능비의 분포가 더 가치 있을 수 있다[167]. 이는 훨씬 이전에 모든 태양광시스템이 잘 작동한다는 가정 하에 단일 성능비로 0.85를 사용하여 연간 수율에서의 지역적인 차이를 가시화하기 위해 제안되었다[170].

5.5 장기간의 열화율: 태국 방콕에 있는 소형 시스템의 사례 연구

가장 큰 의문 중 하나는 에너지등급이 장기적으로 태양광기술, 나아가서는 설치시스템에 대해 어떤 종류의 정보를 가질 수 있는가이다. 이를 명확히 규명하기 위해서는 아마도 에너지등급, 에너지수율 그리고 장기 성능 사이의 차이점을 이해할 필요가 있을 것이다.

이 보고서의 초점이 되었던 에너지등급은 IEC 61853 시리즈 규격에 기술되어 있고, 출력(watts), 에너지(watt-hours) 및 성능비에 기반하여 태양광모듈의 성능을 평가한다. 에너지수율은 적어도 일년 동안 태양광기술의 성능을 모니터링하는 기술의 박람회 성격이다[171]. 장기 성능평가는 여러 해 동안의 작동 결과를 대표하는 측정이다.

표 20은 이런 차이를 요약한 것이다.



	PV 에너지등급	PV 에너지수율	장기 성능평가
근거 기준	표준 조건하에서의 순수 계산	실제 작동조건하에서의 측정	실제 작동조건
기간	-	1년	작동 년수
목표	다양한 기후지역을 포함하는 1년의 데이터세트를 토대로 한 예상 성능평가	일년 동안 하나의 특정 위치에서의 실 성능 평가	장기간 하나의 특정 위치에서의 실제 성능 평가
규격/관행	IEC 61853 시리즈 규격	IEC 규격(예: IEC 60904-x, IEC 61853- x)에 의거한 태양광모듈 특성분석 I-V 곡선, MPP 및 환경데이터의 측정 (IEC 60904-1, IEC 61829, IEC 61724-1)	IEC 규격(예: IEC 60904-x, IEC 61853-x)에 의거한 태양광모듈 특성분석 I-V 곡선, MPP 및 환경데이터의 측정 (IEC 60904-1, IEC 61829, IEC 61724-1) 점검, 지속적 모니터링, 청소 절차, 재시험

표 20: 비교: 에너지등급, 에너지수율 그리고 장기 성능평가

여러 인자들이 에너지수율 성능과 연관됨을 인식하고 있음에도 불구하고, 장기 성능은 여전히 불명확하다. 비교적 기술의 성숙도가 높고 시장 점유율이 높은 결정질실리콘 모듈의 경우에는 20년 이상까지의 성능 연구결과가 문헌에 소개되어 있다.[73, 172]. 박막기술의 경우는 연구가 부족한 실정이다[173, 174]. 이들 연구 가운데에서 태양광시스템의 열화로부터 오는 태양광모듈의 성능 열화를 구분하는 것이 중요하다. 태양광시스템의 경우, 소위 주변장치(BOS) 라고 부르는 다른 구성요소들의 손실 때문에 열화가 더 높게 나타난다.

결정질실리콘은 성숙된 기술이지만 모든 불량의 100 %가 알려진 것은 아니고, 시간이 지남에 따라 새로운 현상이 나타나고 이것이 장기적으로 지속적으로 나타나게 될 것인데, 특히 PERC, n-pert, 양면형 같은 보다 최신의 기술에서도 나타날 수 있으므로 여기에 대한 해결책 연구가 포함되어야 할 것이다.

이번 장에서는 태국에 있는 한 시스템의 사례를 통해 문제시 되고 있는 태양광모듈의 장기 열화에 대해 논의하고자 한다.

5.5.1 사례 연구에 대한 소개

태국에서의 태양광시스템은 1970년대에 시작하여 수십년 동안 가동되고 있다[175]. 초기에는 대부분이 독립형(stand-alone) 시스템으로 통신 분야에 활용되었다. 1980년대에는 계통에 연계되지 않은 독립형 시스템들이 농촌 지역에 광범위하게 보급되었는데, 학교, 물 펌프 그리고 배터리 충전소 등에 활용되었다. 1990년대에는 태양광모듈과 주변장치 제조업체들이 설립되었다. 급속한 성장은 2000년대로, 정부의 보조금 지원 프로그램인 Solar Home Project(SHP) 덕분이었다. 제품의 품질 관리 목적으로 모듈과 주변장치 시험소들도 또한 설립되었다. 태국 정부가 2018년에 발전용량



누계 2.9 GW을 목표로 가산 및 발전차액 지원제도(feed-in tariff) 프로그램을 시행하면서 성장은 계속되고 있다[176]. 설치의 대부분은 발전소 규모(utility-scale)의 프로젝트이다. 태양광 발전은 2037년까지 10 GW 를 목표로 한 "태국 전력개발 계획(Thailand Power Development Plan: PDP2018)에 포함되어 있다[177].

현재, 10년 이상된 많은 시스템들이 모듈과 주변장치 양쪽에서 열화와 불량을 보이고 있다. National Science and Technology Development Agency(NSTDA)의 연구원들은 덥고 습한 기후에 설치된 3년 이상된 다결정실리콘 모듈에서 연간 0.5 %의 열화율을 보고하였다[178]. CES Solar Cells Testing Center(CSSC)는 태국 만 가까이에 설치된 후 13년 이상 경과된 단결정과 다결정실리콘 모듈에서 각각 연 평균 1.14 %와 1.41 %의 열화율을 보고하였다[179, 180].

태양광시스템의 신뢰성은 태양광모듈의 열화에 의해 크게 영향을 받는다. 원인과 결과에 대한 조사연구는 예방과 사후 바로잡는 차원에서 중요하다. 전기적 열화와 물리적인 모듈의 퇴화에 대해서는 이전에 언급하였다[179]. 여기서는 15년 이상 오래된 하나의 시스템을 대상으로 기상 측정, 시스템 성능비 그리고 모듈 성능뿐 아니라 매년 육안 검사결과와 EL 이미지 결과를 사용하여 조사분석하였다.

5.5.2 배경 시스템 정보

연구된 시스템은 평평한 지붕 위에 설치된 용량 3.12 kW_p 계통연계시스템으로 2개의 스트링으로 구성된 32개 모듈을 가지고 있다. 위치는 바다에 가까운 남부 방콕의 덥고 습한 기후에 속하는 13°34'N 에 100°26'E 이다. 2003년에 설치되어 계속 작동 중이다. 모든 모듈은 결정질실리콘으로 모듈의 반은 현지에서 조립한(단결정 혹은 다결정?) 것이고 나머지 반은 수입한(단결정 혹은 다결정?) 것이다. 모니터링 시스템은 2010년에 설치되었는데, 면내 조사강도, 주위와 모듈온도, 풍속과 풍향 그리고 상대 습도 같은 기상데이터를 측정한다.

5.5.3 데이터 모니터링

측정은 샘플링 간격을 30초로 하여 IEC 61724 규격에 따라 수행하였다[141]. 대상 파라미터는 다음과 같다.

- 1. 기상 파라미터: 경사 14도에 남향으로 설치된 면내 글로벌 조사강도(W/m²), T-형 열전대를 사용한 주위온도(°C), 풍속(m/s).
- 2. 태양광어레이 파라미터: 출력 DC 전압(V)과 전류(A)는 DC 미터로 인버터 입력단 앞 스트링에서 측정하고 모듈의 후면온도(°C)는 T-형 열전대로 측정.
- 3. 인버터로부터의 출력 파라미터: 계통 그리드 AC 전압(V), 계통 그리드로 가는 AC 전류(A) 그리고 계통 그리드로 가는 AC 유효전력(kW).

5.5.4 태양광모듈 시험

32개의 모든 모듈은 매년 IEC 61215[181]에 따라 ISO/IEC17025 인정 시험소인 CSSC 에서 시험하였다. 시험에는 (1) 육안검사, (2) STC (1000 W/m², AM. 1.5, 25 °C) 조건에서의 성능, (3) 절연성, (4) EL 이 포함된다. 상대적인 전기적 파라미터들은 최대출력 P_{max}, 단락전류 I_{sc}, 최대출력점에서의 전류 I_{mp} 그리고 개방전압 V_{oc} 이다. 열화율을 계산하고 측정결과는 해당 모듈 명판의 값과 비교하였다.



5.5.5 기상학 결과

면내 태양광 조사량은 연간 1,810~2,005 kWh/m² 사이였다. 2012~2018년 시스템 모니터링 데이터로부터 일간 면내 조사량의 50번째 백분위수(50th percentile)는 5.30 kWh/m² 이었다. 그림 80은 면내 조사량의 (a) 확률밀도 함수(PDF) 와 (b) 누적 분포 함수(CDF)이다. 면내 조사량의 평균은 연간 약 1,891 kWh/m² 이었다.



그림 80: 2012~2018 동안 기록된 사이트에서의 면내 조사량; (a) 확률밀도함수(PDF) 와 (b) 누적분포함수(CDF) 평균 = 5.31 (kWh/m²/day) 그리고 표준편차 = 1.26 (kWh/m²/day).

그림 81은 사이트에서의 월간 평균온도를 보여준다. 2012~2016년의 측정 데이터에서 평균 주위(밤 시간 포함)온도는 29.1℃ 이다. 최고 온도는 4월의 36.0℃, 최저 온도는 2월의 20.0℃ 이다. 평균 모듈온도는 33.3℃ 이다. 최고 모듈온도는 9월에 67.4℃ 인데, 이는 겨울 동안의 높은 조사강도로부터 누적된 열 때문이다. 최저 모듈온도는 20.0℃ 인데, 이는 1월의 주위온도와 같다. 주위온도와 모듈온도 사이의 가장 큰 차이는 9월의 47.0℃ 이다. 평균 상대습도는 약 78 %이고, 기록된 모듈온도는 19.6~67.4℃ 범위이다.



그림 81: 2010~2018 기간의 월 평균 주위온도(좌)와 모듈온도(우).

시스템의 성능비

성능비는 표 20에서와 같이 2012~2019년에 평가된 것인데, 평가절차는 IEC 61724를 따랐다.


연도	면내 조사량 (kWh/m²/year)	AC 에너지 (kWh/year)	수율 (kWh/kWp)	성능비 (%)	참고
2012	1,888	3,859	1,237	66	lsc 로 태양광모듈의 위치를 조정
2013	1,810	3,992	1,279	71	조사량 2013 (2013년 4월 22~30 의 데이터로부터 평가)
2014	1,929	4,000	1,282	66	-
2015	1,963	3,971	1,273	65	-
2016	2,005	3,282	1,052	62	-
2017	1,818	3,033	972	53	2 달간 시스템 연결 끊어짐
2018	1,821	3,641	1,167x	64	준비와 재설치

표 21: 태양광시스템 성능 (설치 용량은 3.12 kWp).

5.5.6 전기적 열화

32개 모든 모듈은 IEC61215:2005에 따라 STC 에서의 성능 측정을 2010년부터 매년 실시하여 왔다. I-V 곡선으로 구성된 전기적 파라미터 - 단락전류 I_{sc}, 개방전압 V_{oc}, 최대출력점에서의 전류 I_{mp} 와 전압 V_{mp}, 최대출력점에서의 전력 P_{mp}, 충진율 FF - 는 STC 조건에서 CSS 에 의해 측정이 이루어졌다. 성능 측정의 불확도는 2.24 %이다.

STC에서 I-V 특성분석으로 얻은 파라미터는 연간 열화율 결정을 위해 매년 평가하였는데, 그 결과는 그림 82와 같다. 여기서는 공칭(명판)값 대비 각 I-V 파라미터의 연간 열화율을 보여준다. 다결정실리콘 모듈의 출력 산출량은 -0.06의 기울기로 감소하였고, Imp 와 Vmp 역시 각각 -0.04와 -0.03의 기울기로 감소하였다. 단결정실리콘 모듈의 출력 산출량 결과와 그 타당성은 아직 분석 중이다.





그림 82: 명판 대비 전기적 파라미터의 열화; (a) 다결정 Si 모듈, (b) 단결정 Si 모듈.

146







 2010
 2013
 2015
 2016

 2017
 2018
 2015
 2016

그림 83: 2010~2018년 기간 동안 다결정 Si 사례 모듈의 전면과 후면.

a)

b)



그림 84: (a) 백시트 박리와 쵸킹 (b) 갈변을 보여주는 시각적 결함(B), 균열(C), 부식(Co), 박리(D)와 달팽이 자국(S). Source: [182].

전기적 특성분석후에 EL 이미지를 수정하였다. 다결정 Si 모듈은 다음과 같은 불량 -가장자리 웨이퍼의 결정 전위, 핑거 불량, 균열과 미세균열 - 을 나타내었다[183]. 그림



85는 2016~2018년 기간 동안 동일한 다결정 Si 모듈의 EL 이미지이다. 단결정 Si 모듈은 그림 86에서와 같이 단지 션트 결함만을 나타내었다.



그림 85: 2016~2018년 기간 동안 다결정 Si 사례 모듈의 EL 이미지.



그림 86: 2016~2018년 기간 동안 단결정 Si 사례 모듈의 EL 이미지.



5.5.7 결론

대상 태양광모듈에서 시스템 성능에 영향을 미치는 모듈 열화가 관찰되었다. 이 연구에서 다결정 Si 모듈의 출력 열화율은 연간 -1.47 %이고, 단결정 Si 모듈의 경우는 그 결과와 타당성을 분석 중에 있다. 매년 관찰을 통해 박리 면적, 부식 면적 그리고 갈변의 정도 같은 물리적인 열화는 증가하고 있음을 알 수 있었다. 이들 결함들은 모듈의 성능에 영향을 미치므로 정량화하여야 한다. 우리는 모니터링 데이터를 연간 시계열 육안 결함과 전기적 성능과의 비교를 통해 기후 인자와 모듈열화 사이의 상관관계를 찾기 위한 노력을 지속할 계획이다. 가까운 미래에, STC 결과와 비교한 모듈 성능 열화의 상호연관성과 함께 이 시스템의 열화를 분석할 계획이다.



6 결론

IEC 61853 시리즈 규격 "태양광모듈 성능시험과 에너지등급(Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating" (Part 1 to 4))은 기후조건에 따른 태양광모듈의 성능을 분석할 수 있는 간단하지만 실제적 추정이 가능한 방법론을 제공한다. 최종 산출물은 소위 기후 특성에 따른 에너지등급(Climate Specific Energy Rating: CSER)이라고 부르는 파라미터이다. CSER 은 만 일년의 기간 동안 태양광모듈의 성능비에 해당하는데, 실제 작동조건 하에 있는 다양한 태양광기술 혹은 모듈의 성능을 비교할 수 있게 해준다. 만약 CSER 값이 1 이라면, 이는 태양광모듈의 평균 효율이 STC 에서의 효율과 같다는 의미이다. 만약 수율 손실이 지배적이라면, CSER 은 1 보다 낮은 값을 갖게 된다.

CSER 계산의 입력데이터로 필요한 모듈 특성은 다양한 조사강도와 모듈온도 하에서의 성능(G-T 매트릭스), 각도응답(AR), 분광응답(SR), 그리고 공칭 모듈 작동온도(NMOT)를 포함한다. 이들 측정 절차는 IEC 시리즈 규격 Part 1과 2에 기술되어 있다.

Part 3은 CSER 값의 계산에 필요한 방법론을 정하고 있는데, 첫 2개 Part 의 결과에 추가하여 입력데이터로 Part 4에 있는 기준 기후 데이터세트를 포함시키고 있다. 현재, 사용자는 6개의 기후 데이터세트(온대 대륙, 온대 해안, 열대 습한, 아열대 건조, 아열대 해안, 고지대) 로부터 선택할 수 있는데, 이 모두는 만 일년 기간의 시계열 시간별 기상 파라미터 데이터를 포함하고 있다. 기후 데이터세트는 또한 분광 조사강도 데이터를 포함하고 있는데, 이는 고 해상도가 아닌 저 해상도로 파장 300~4,000 nm 범위에서 29개의 데이터 포인트로 포맷되어 있다. 분광 조사강도를 평균하는 파장 간격은 또한 "Kato-bands"로 알려져 있다.

Part 1과 2와 관련하여, 이 보고서는 옥내와 옥외 특성분석에 대한 정보를 제공하는데, 그 내용은 이들 측정의 목적과 그리고 두 가지 접근방식(옥내와 옥외)의 주요 장점과 단점을 강조하는 것이다. 그리고 이들 측정에 대한 모범적인 결과를 상세히 검토한다.

태양광모듈의 에너지수율에 대해 언급하는 것은 역시 기후 데이터세트를 설정하는 것이 되므로, 기후 분류는 중요한 역할을 한다. 이 보고서는 글로벌 접근방식을 조사하였는데, 태양광 기후대(PVCZ) 스킴은 Arrhenius 법칙에 기반한 태양광모듈의 열화를 이해하기 위한 목적이고, 그리고 KGPV 스킴은 맵에서 새로운 하나의 층으로 조사량을 포함시킴으로써 KG 기후 분류를 확장한다. 기후 분류는 다면적인 문제를 제시하는데, 그 해결책은 특정성, 정확성, 간편성 그리고 적용가능성 사이의 균형을 찾는 것이다. 많은 노력이 있었지만, 여전히 현장에서 관찰된 열화 모드와의 상호연관성 규명이 필요시 되고 있다.

현재 IEC 61853 에너지등급의 범위는 단일접합 단면형 소자를 커버한다. 만약 미래에 양면형 혹은 다중접합 소자 같은 다른 소자들이 고려되어야 한다면, 표준 데이터세트는 수정되거나 확장되어야 한다. 새로운 변수들은 새로운 소자의 성능을 모델링하는데 사용되는 방법론과 글로벌 스케일에서 데이터의 가용성에 의존할 것이다.

IEC 에너지등급 규격의 또 다른 한계는, 낮은 조사강도 수준에서의 성능과 같은 모델링된 특성분석에서 상당한 비선형성을 가진 소자에 관한 것이다.

이 보고서는 또한 에너지등급에 관한 인정 시험소와 기관들의 접근방식을 조사하였다. 복상(bi-phase), 컬러와 BIPV 모듈 같은 비교적 새로운 기술들과 기타 태양광 솔루션에 대한 실험 결과들 역시 제시되었다. IEC 61853 방법뿐 아니라 이들 접근법과 결과들에



대해서는, 에너지등급에서의 불확도가 고려될 것이다. 다른 추정 모델에서와 같이, 사용된 입력데이터와 적용 계산 모델 자체에서 시스템적인 그리고 무작위 오류들이 일어날 수 있는데, 왜냐하면 이들이 모든 태양광기술에 대해 유사한 수준으로 견고하고 대표성이 있는 것이 아니기 때문이다. 따라서 효율이 옥외조건에 장기간 노출됨에 따라 영향을 받는 소자들의 경우에는 고려해야 할 영향들이 달라져 결론이 잘못 내려질 수 있으므로, 그 결과들을 조심스럽게 다루어야 한다. 장기 안정성이 부족한 소자들은 실제 수명 동안의 성능에 비해 과대평가된 등급을 받을 수 있다. 이런 요인들과 기타 가능한 불확도의 요인들 또한 논의되었다.

태양광산업계에서는 더 높은 효율과 더 낮은 LCOE 를 요구함에 따라 출력 대신에 에너지의 개념이 점점 더 중요해 지고 있어, 이와 함께 새롭고 더 좋은 에너지등급 방법의 개발에 착수하게 되었다.



참고문헌

[1] E. Dunlop, A. Gracia Amillo, E. Salis, T. Sample, and Taylor, N., *Transitional methods for PV modules, inverters and systems in an Ecodesign Framework*. EUR 29513 EN, ISBN: 978-92-79-98284-2 (online), doi: 10.2760/496002. Luxemburg, 2019.

[2] D. Moser, S. Lindig, M. Richter, J. Ascencio Vásquez, I. Horvath, B. Müller, M. Green, J. Vedde, M. Herz, B. Herteleer, K.A. Weiß, and B. Stridh, "Uncertainties in Yield Assessments and PV LCOE: Report IEA-PVPS T13-18:2020," IEA Report Photovoltaic Systems Programme, International Energy Agency.

[3] *IEC 61853-1: Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating*, 1.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission, 2011.

[4] *IEC 61853-2: Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 2: Spectral responsivity, incidence angle and module operating temperature measurements,* 1.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission, 2016.

[5] *IEC 61853-3: Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 3: Energy rating of PV modules*, 1.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission, 2018.

[6] *IEC 61853-4: Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 4: Standard reference climatic profiles*, 1.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission, 2018.

[7] T. Huld, A. Gracia Amillo, T. Sample, E. D. Dunlop, E. Salis, and R. Kenny, "The completed IEC 61853 standard series on PV module energy rating, overview, applications and outlook," in Proc. 35th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC) pp. 1113–1118. Brussels, Belgium, 2018.

[8] C. Reise ,B. Müller, D. Moser, A. Driesse, G. Razongles, and M. Richter, "Uncertainties in PV System Yield Predictions and Assessments," Report IEA-PVPS T13-12:2018, International Energy Agency, Paris, France, 2018.

[9] M. Schweiger, J. Bonilla, W. Herrmann, A. Gerber, and U. Rau, "Performance stability of photovoltaic modules in different climates," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 25, no. 12, pp. 968–981, 2017, doi: 10.1002/pip.2904.

[10] B. Marion, B. Kroposki, K. Emery, J. del Cueto, D. Myers, and C. Osterwald, "Validation of a Photovoltaic Module Energy Ratings Procedure at NREL," *NREL Technical Report*, NREL/TP-520-26909, 1999, doi: 10.2172/12187.

[11] D. Dirnberger, B. Müller, and C. Reise, "PV module energy rating: opportunities and limitations," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 23, no. 12, pp. 1754–1770, 2015, doi: 10.1002/pip.2618.

[12] A. Louwen, A. C. de Waal, R. E. I. Schropp, A. P. C. Faaij, and W. G. J. H. M. van Sark, "Comprehensive characterisation and analysis of PV module performance under real operating conditions," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 25, no. 3, pp. 218–232, 2017, doi: 10.1002/pip.2848.

[13] T. Huld, E. Salis, A. Pozza, W. Herrmann, and H. Müllejans, "Photovoltaic energy rating data sets for Europe," *Solar Energy*, vol. 133, pp. 349–362, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.03.071.

[14] M. Schweiger, W. Herrmann, A. Gerber, and U. Rau, "Understanding the Energy Yield of Photovoltaic Modules in Different Climates by Linear Performance Loss Analysis," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0682.



[15] B. Bora, R. Kumar, O. S. Sastry, B. Prasad, S. Mondal, and A. K. Tripathi, "Energy rating estimation of PV module technologies for different climatic conditions," *Solar Energy*, vol. 174, pp. 901–911, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.09.069.

[16] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, "World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated," *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 15, pp. 259–263, 2006, doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

[17] F. R. M. Kottek, *World map of the köppen-geiger climate classification*. [Online]. Available: http:// koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/

[18] D. Dirnberger, B. Müller, and C. Reise, "On the uncertainty of energetic impact on the yield of different PV technologies due to varying spectral irradiance," *Solar Energy*, vol. 111, pp. 82–96, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2014.10.033.

[19] M. Bliss, T. R. Betts, and R. Gottschalg, "Indoor measurement of photovoltaic device characteristics at varying irradiance, temperature and spectrum for energy rating," *Measurement Science and Technology*, vol. 21, no. 11, p. 115701, 2010, doi: 10.1088/0957-0233/21/11/115701.

[20] T. Huld, G. Friesen, A. Skoczek, R. P.Kenny, T. Sample, M. Field, E. Dunlop, "A power-rating model for crystalline silicon PV modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells - SOLAR ENERG MATER SOLAR CELLS*, vol. 95, pp. 3359–3369, 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2011.07.026.

[21] R. P. Kenny, D. Viganó, E. Salis, G. Bardizza, M. Norton, H. Müllejans, and W. 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, no. 6, pp. 1384–1399, 2013, doi: 10.1002/pip.2365.

[22] D. Dirnberger, G. Blackburn, B. Müller, and C. Reise, "On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 132, pp. 431–442, 2015, doi: 10.1016/j.solmat.2014.09.034.

[23] G. Kleiss, H. Schülbe, and B. Nacke, "Energy rating of crystalline solar modules: investigation of uncertainties due to binning in mass production," in Proc. 32nd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-41-8 pp. 2244 - 2247. Munich, Germany, 2016.

[24] B. Müller, L. Hardt, A. Armbruster, K. Kiefer, and C. Reise, "Yield predictions for photovoltaic power plants: empirical validation, recent advances and remaining uncertainties," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 24, no. 4, pp. 570–583, 2016, doi: 10.1002/pip.2616.

[25] S. Ransome and J. Sutterlueti, "Degradation analysis of PV technologies using NREL and Gantner Instruments outdoor data," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2016, pp. 3441–3446.

[26] I. Geisemeyer, N. Tucher, B. Müller, H. Steinkemper, J. Hohl-Ebinger, M. C. Schubert and W. Warta, "Angle Dependence of Solar Cells and Modules: The Role of Cell Texturization," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 1, pp. 19–24, 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2614120.

[27] B. Müller, P. Bostock, B. Farnung, and C. Reise, Eds., "A Framework to Calculate Uncertainties for Lifetime Energy Yield Predictions of PV Systems,"

[28] J. Polo, M. Alonso-Abella, J. A. Ruiz-Arias, and J. L. Balenzategui, "Worldwide analysis of spectral factors for seven photovoltaic technologies," *Solar Energy*, vol. 142, pp. 194–203, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2016.12.024.

[29] S. Ransome, "Validating Energy Yield Modelling with the NREL Outdoor Dataset," in 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), 2018, pp. 2713–2718.

[30] M. Richter, "Reducing uncertainty in PV yield assessments," *PV Tech Power*, no. 14, pp. 50–56, 2018.



[31] B. Hüttl, L. Gottschalk, S. Schneider, D. Pflaum, and A. Schulze, "Accurate performance rating of photovoltaic modules under outdoor test conditions," *Solar Energy*, vol. 177, pp. 737–745, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2018.12.002.

[32] S. Ransome and J. Sutterlueti, "How to Choose the Best Empirical Model for Optimum Energy Yield Predictions," in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2017, pp. 652–657.

[33] S. Ransome and J. Sutterlueti, "Checking the new IEC 61853.1-4 with high quality 3rd party data to benchmark its practical relevance in energy yield prediction," in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2019, pp. 2229–2234.

[34] S. Ransome and J. Sutterlueti, "Quantifying long term PV performance and degradation under real outdoor and IEC 61853 test conditions using high quality module iv measurements," in Proc. 36th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-60-4 pp. 1640 - 1645. Marseille, France, 2019.

[35] T. Karin, C. B. Jones, and A. Jain, "Photovoltaic climate zones: The global distribution of climate stressors affecting photovoltaic degradation," in Proc. 36th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC) pp. 825-834. Marseille, France, 2019.

[36] T. Karin, C. B. Jones, and A. Jain, "Photovoltaic Degradation Climate Zones," in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2019, pp. 687–694.

[37] J. Ascencio-Vásquez, I. Kaaya, K. Brecl, K.-A. Weiss, and M. Topič, *Global Climate Data Processing and Mapping of Degradation Mechanisms and Degradation Rates of PV Modules,* 1996-1073, doi: 10.3390/en12244749, 2019.

[38] J. Ascencio-Vásquez, K. Brecl, and M. Topič, "Methodology of Köppen-Geiger-Photovoltaic climate classification and implications to worldwide mapping of PV system performance," *Solar Energy*, vol. 191, pp. 672–685, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.08.072.

[39] *IEC 60904-9: Photovoltaic devices - Part 9: Classification of solar simulator characteristics*, 3.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission, 2020.

[40] M. Schweiger, "Performance of PV modules with different technologies and the impact on energy yield in four climatic zones," Ph.D. dissertation, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2017. [Online]. Available: http://publications.rwth-aachen.de/record/711967/files/711967.pdf

[41] *IEC 60904-3: Photovoltaic devices -Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*, 4.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission, 2019.

[42] *IEC 60904-7: Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices(PV) solar devices with reference spectral irradiance data*, 4.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission, 2019.

 [43] W. Herrmann, M. Schweiger, L. Rimmelspacher, "Solar Simulator Measurement Procedures for Determination of the Angular Characteristic of PV Modules," in Proc. 29th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-34-5 pp. 2403 - 2406. Amsterdam, Niederlande, 2019.

[44] 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 National Laboratories, 2016. [Online]. Available: https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2016/165284.pdf

[45] D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil, "Photovoltaic Array Performance Model," Sandia National Laboratories, 2004. [Online]. Available: https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2016/ 165284.pdf

[46] W. De Soto, S.A. Klein, and W.A. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance," *Solar Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, 2006, doi: 10.1016/j.solener.2005.06.010.



[47] B. H. King, D. Riley, C. D. Robinson, and L. Pratt, "Recent advancements in outdoor measurement techniques for angle of incidence effects," in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2015, pp. 1–6.

[48] N. Martin and J. M. Ruiz, "Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 70, no. 1, pp. 25–38, 2001, doi: 10.1016/S0927-0248(00)00408-6.

[49] D. L. King, J. A. Kratochvil, and W. E. Boyson, "Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors," in *1997 IEEE 26th Photovoltaic Specialists Conference* (*PVSC*), 1997, pp. 1113–1116.

[50] R.M.E. Valckenborg, B. Van Aken, "Outdoor Performance Quantification and Understanding of Various PV Technologies using the IEC 61853 Matrix," in Proc. 36th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-60-4 pp. 880 - 886. Marseille, France, 2019.

[51] P. Illich, G.C. Eder, K.A. Berger, G. Újvári, P. Gaisberger, D. Moor, M. Aichinger, S. Boddaert, R.M.E. Valckenborg, J. van den Brand, P. Bonomo, F. Frontini, C.S. Polo López, M. Del Buono, A.G. Imenes, N. Martín Chivelet, F. Chenlo, A. Sanz Martinez, M. Machado, J.-T. Kim, A. Masolin and M. Ritzen, "Comparative Performance Measurements of Identical BIPV-Elements in Different Climatic Environments - A Round Robin Action within the IEA PVPS Task 15 Collaboration," in Proc. 35th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-50-7 pp. 1794 - 1800. Brussels, Belgium, 2017.

[52] L. Gaisberger, P. Rechberger, G. Eder, K. Berger, Ú. Gusztáv, P. Illich, D. Moor, S. Boddaert, R. Valckenborg, P. Bonomo, C. Polo, M. Del Buono, N. Martin Chivelet, E. Mejuto, A. Sanz, M. Machado, J-T. Kim and M. Ritzen, "BIPV Round-Robin Action of IEA PVPS Task 15," in Proc. 35th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-50-7 pp. 1794 - 1800. Brussels, Belgium, 2017.

[53] A. F. Souka and H. H. Safwat, "Determination of the optimum orientations for the double-exposure, flatplate collector and its reflectors," *Solar Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 170–174, 1966, doi: 10.1016/0038-092X(66)90004-1.

[54] *PV Performance Modeling Collaborative | An Industry and National Laboratory collaborative to improve Photovoltaic Performance Modeling.* [Online]. Available: https://pvpmc.sandia.gov/pv-research/pv-lifetime-project/ pv-lifetime-modules/ (accessed: Oct. 8 2020).

[55] *IEC TS 60904-1-2: Photovoltaic devices - Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovol-taic (PV) devices*, 1.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission, 2019.

[56] *Measurement procedures for current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) modules*, 2018.

[57] J. S. Stein, "Characterizing and modeling the performance of bifacial photovoltaic modules and systems," in 7th PVPMC Workshop on Energy Rating and Module Performance Modeling, ISBN: SAND2017-3088 C. Lugano, Switzerland, Mar. 30 2017.

[58] R. Valckenborg, "[Duplikat] Characterizing and modeling the performance of bifacial photovoltaic modules and systems: Application of IEC 61853 matrix to bifacial PV," in bifiPV workshop. Lugano, Switzerland, 16-18 September, 2019.

[59] F. Rubel and M. Kottek, "Comments on: "The thermal zones of the Earth"" by Wladimir Köppen (1884)," *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 20, pp. 361–365, 2011, doi: 10.1127/0941-2948/2011/0285.

[60] R. Geiger, Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik: Ch. Klassifikation der Klimate nach W. Koppen. Berlin, 1954.

[61] F. Rubel and M. Kottek, "Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification," *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 19, pp. 135–141, 2010, doi: 10.1127/0941-2948/2010/0430.



[62] F. Rubel, K. Brugger, K. Haslinger, and I. Auer, "The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800–2100," *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 26, pp. 115–125, 2017, doi: 10.1127/metz/2016/0816.

[63] M. C. Peel, B. L. Finlayson, and T. A. McMahon, "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 5, pp. 1633–1644, 2007, doi: 10.5194/hess-11-1633-2007.

[64] D. J. Kriticos, B. L. Webber, A. Leriche, N. Ota, I. Macadam, J. Bathols and J. K. Scott, "CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling," *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 3, no. 1, pp. 53–64, 2012, doi: 10.1111/j.2041-210X.2011.00134.x.

[65] H. E. Beck, N. E. Zimmermann, T. R. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, and E. F. Wood, "Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution," *Scientific Data*, vol. 5, no. 1, p. 180214, 2018, doi: 10.1038/sdata.2018.214.

[66] J. R. Russell, *Dry Climates of the United States: I Climatic Map*: Publications in Geography, 1931.

[67] Y. Wang, W. Huang, A. Fairbrother, L. S. Fridman, A. J. Curran, N. R. Wheeler, S. Napoli, A. Hauser, S. Julien, X. Gu, G. Obrien, K. T. Wan, L. Ji, M. Kempe, K. Boyce, R. French and L. Bruckman, "Generalized Spatio-Temporal Model of Backsheet Degradation From Field Surveys of Photovoltaic Modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2928700.

[68] S. Julien, M. Kempe, J. Eafanti, J. Morse, Y. Wang, A. Fairbrother, S. Napoli, A.W. Hauser, L. Ji, G. O'Brien, X. Gu, R. French, L. Bruckman, K.T. Wan and K. Boyce, "Characterizing photovoltaic backsheet adhesion degradation using the wedge and single cantilever beam tests, Part I: Field Modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 215, p. 110669, 2020, doi: 10.1016/j.solmat.2020.110669.

[69] Y. Lyu, A. Fairbrother, M. Gong, J.H. Kim, X. Gu, M. Kempe,S. Julien, K. T.Wan,S. Napoli, A. Hauser,G. O'Brien, Y. Wang, R. French, L. Bruckman, L. Ji and K. Boyce, "Impact of environmental variables on the degradation of photovoltaic components and perspectives for the reliability assessment methodology," *Solar Energy*, vol. 199, pp. 425–436, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.02.020.

[70] Y. Lyu, A. Fairbrother, M. Gong, J. H. Kim, A. Hauser, G. O'Brien and X. Gu, "Drivers for the cracking of multilayer polyamide-based backsheets in field photovoltaic modules: In-depth degradation mapping analysis," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 28, no. 7, pp. 704–716, 2020, doi: 10.1002/pip.3260.

[71] D. A. Gordon, W.-H. Huang, D. M. Burns, R. H. French, and L. S. Bruckman, "Multivariate multiple regression models of poly(ethylene-terephthalate) film degradation under outdoor and multi-stressor accelerated weathering exposures," *PloS one*, vol. 13, no. 12, e0209016, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0209016.

[72] K. Boyce, S. Merzlic, A. Fairbrother, X. Gu, S. Julien and K.T. Wan, L. Ji, A. Lefebvre, G. O'Brien, Y. Wang, L. Bruckman, R. French and M. Kempe, *Degradation analysis of field-exposed photovoltaic modules with non-fluoropolymer-based backsheets*, doi: 10.1117/12.2272488, 2017.

[73] D. C. Jordan, S. R. Kurtz, K. VanSant, and J. Newmiller, "Compendium of photovoltaic degradation rates," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 24, no. 7, pp. 978–989, 2016, doi: 10.1002/pip.2744.

[74] M. Koehl, M. Heck, and S. Wiesmeier, "Categorization of weathering stresses for photovoltaic modules," *Energy Science & Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 93–111, 2018, doi: 10.1002/ese3.189.

[75] G. C. Eder, Y. Voronko, S. Dimitriadis, K. Knöbl, G. Újvári, K. A. Berger, M. Halwachs, L. Neumaier, and C. Hirschl, "Climate specific accelerated ageing tests and evaluation of ageing induced electrical, physical, and chemical changes," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 27, no. 11, pp. 934–949, 2019, doi: 10.1002/pip.3090.

[76] I. Kaaya, M. Koehl, A. P. Mehilli, S. d. C. Mariano, and K. A. Weiss, "Modeling Outdoor Service Lifetime Prediction of PV Modules: Effects of Combined Climatic Stressors on PV Module Power Degradation," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 4, pp. 1105–1112, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2916197.



[77] Bekeley Lab, *PVTOOLS*. [Online]. Available: https://pvtools.lbl.gov/pv-climate-stressors (accessed: Oct. 28 2020).

[78] R. J. Wieser, A. Xin, R. French, and L. Bruckman, "Evaluation and Prediction of Koeppen Geiger Climate Zone Based off of Real-World Satellite Weather Data," in PVSC 47. Virtual: IEEE. [Online]. Available: https://www.ieee-pvsc.org/virtual/index.php?page=presentation&session_id=126&presentation_id=527##, 2020.

[79] B. Chelsey, N. R. Wheeler, F. Rubel, and R. French, *Package 'kgc'-Kgc: Koeppen-Geiger Climatic Zones.* [Online]. Available: ttps://cran.r-project.org/package=kgc.

[80] J. Ascencio Vasquez, *Data for: Methodology of Köppen-Geiger-Photovoltaic climate classification and implications to Worldwide Mapping of PV System Performance: Mendeley Data.* doi: 10.17632/z3byd8jyfn.1. [Online]. Available: https://data.mendeley.com/datasets/z3byd8jyfn/1

[81] T. Ishii, K. Otani, A. Itagaki, and 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, doi: 10.1002/ese3.3.

[82] N. Lindsay, Q. Libois, J. Badosa, A. Migan-Dubois, and V. Bourdin, "Errors in PV power modelling due to the lack of spectral and angular details of solar irradiance inputs," *Solar Energy*, vol. 197, pp. 266–278, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.12.042.

[83] D. Moser, M. Del Buono, U. Jahn, M. Herz, M. Richter, and K. de Brabandere, "Identification of technical risks in the photovoltaic value chain and quantification of the economic impact," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 25, no. 7, pp. 592–604, 2017, doi: 10.1002/pip.2857.

[84] P. M. Rodrigo, E. F. Fernández, F. M. Almonacid, and P. J. Pérez-Higueras, "Quantification of the spectral coupling of atmosphere and photovoltaic system performance: Indexes, methods and impact on energy harvesting," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 163, pp. 73–90, 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2017.01.018.

[85] C. Jardine, T. Betts, R. Gottschalg, D. G. Infield and K. Lane, "Influence of spectral effects on the performance of multijunction amorphous silicon cells," in Proc. of PV in Europe: From PV Technology to Energy Solutions Conf. and Exh., 2002.

[86] N. Pooltananan, P. Sripadungtham, A.Limmanee and E. Hattha, "Effect of spectral irradiance distribution on the outdoor performance of photovoltaic modules," in *ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Confernce on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2010, pp. 71–73.

[87] M. Schweiger, M. Ulrich, I. Nixdorf, L. Rimmelspacher, U. Jahn and W. Herrmann, "Spectral Analysis of Various Thin-Film Modules Using High Precision Spectral Response Data and Solar Spectral Irradiance Data," in Proc. 27th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-28-0 pp. 3284 - 3290. Frankfurt, Germany, 2012.

[88] J. Chantana, Y. Imai, Y. Kawano, Y. Hishikawa, K. Nishioka and T. Minemoto, "Impact of average photon energy on spectral gain and loss of various-type PV technologies at different locations," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1317–1324, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.06.139.

[89] K. Passow and M. Lee, "Effect of spectral shift on solar PV performance," in *2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, 2016, pp. 246–250.

[90] T. Minemoto, Y. Nakada, H. Takahashi and H. Takakura, "Uniqueness verification of solar spectrum index of average photon energy for evaluating outdoor performance of photovoltaic modules," *Solar Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1294–1299, 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.03.004.

[91] M. Tsuji, M. M. Rahman, Y. Hishikawa, K. Nishioka, and T. Minemoto, "Uniqueness verification of solar spectrum obtained from three sites in Japan based on similar index of average photon energy," *Solar Energy*, vol. 173, pp. 89–96, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.07.039.



[92] L. Mutiara, K. Pegels, and A. Reinders, "Evaluation of spectrally distributed irradiance in the Netherlands regarding the energy performance of various PV technologies," in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2015, pp. 1–6.

[93] J. Chantana, Y. Horio, Y. Kawano, Y. Hishikawa, and T. Minemoto, "Spectral mismatch correction factor for precise outdoor performance evaluation and description of performance degradation of different-type photovoltaic modules," *Solar Energy*, vol. 181, pp. 169–177, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.01.094.

[94] 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.

[95] G. Belluardo, G. Barchi, D. Baumgartner, M. Rennhofer, P. Weihs, and D. Moser, "Uncertainty analysis of a radiative transfer model using Monte Carlo method within 280–2500nm region," *Solar Energy*, vol. 132, pp. 558–569, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.03.050.

[96] T. Huld and A. Gracia Amillo, "Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum," *Energies*, vol. 8, pp. 5159–5181, 2015, doi: 10.3390/en8065159.

[97] M. Langenhorst, B. Sautter, R. Schmager, J. Lehr, E. Ahlswede, M. Powalla, U. Lemmer, B. S. Richards and U. W. Paetzold, "Energy yield of all thin-film perovskite/CIGS tandem solar modules," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 27, no. 4, pp. 290–298, 2019, doi: 10.1002/pip.3091.

[98] H. Liu, Z. Ren, Z. Liu, A. G. Aberle, T. Buonassisi, and I. M. Peters, "Predicted outdoor energy yield of Si based tandem solar cells," in doi: 10.1109/PVSC.2016.7749759, pp. 992–996.

[99] R. Moreno Sáez, M. Sidrach-de-Cardona, and L. Mora-López, "Data mining and statistical techniques for characterizing the performance of thin-film photovoltaic modules," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 17, pp. 7141–7150, 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2013.06.059.

[100] M. Piliougine, D. Elizondo, L. Mora-López and M. Sidrach-de-Cardona, "Multilayer perceptron applied to the estimation of the influence of the solar spectral distribution on thin-film photovoltaic modules," *Applied Energy*, vol. 112, pp. 610–617, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.05.053.

[101] J. Del Campo-Ávila, M. Piliougine, R. Morales-Bueno, and L. Mora-López, "A data mining system for predicting solar global spectral irradiance. Performance assessment in the spectral response ranges of thin-film photovoltaic modules," *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 828–839, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.10.083.

[102] J. M. Ripalda, J. Buencuerpo, and I. García, "Solar cell designs by maximizing energy production based on machine learning clustering of spectral variations," *Nature Communications*, vol. 9, no. 1, p. 5126, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-07431-3.

[103] T. Huld, E. Dunlop, H. G. Beyer, and R. Gottschalg, "Data sets for energy rating of photovoltaic modules," *Solar Energy*, vol. 93, pp. 267–279, 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.04.014.

[104] 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. Levit-sky, J. Forbess, F. Talmud, "Improved test method to verify the power rating of a photovoltaic (PV) project," in *2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009, pp. 316–321.

[105] W. Köppen, Ed., *Das geoghaphisca System der Klimate*. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936. [Online]. Available: http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1936.pdf

[106] K. Scharmer *et al., The European Solar Radiation Atlas Vol.2: Database and exploitation software*, 2000.



[107] J. C. Blakesley T. Huld, H. Müllejans, A. Gracia-Amillo, G. Friesen, T.R. Betts and W. Hermann, "Accuracy, cost and sensitivity analysis of PV energy rating," *Solar Energy*, vol. 203, pp. 91–100, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.03.088.

[108] A. Marzo, P. Ferrada, F. Beiza, P. Besson, J. Alonso-Montesinos, J. Ballestrín, R. Román, C. Portillo, R. Escobar, E.Fuentealba, "Standard or local solar spectrum? Implications for solar technologies studies in the Atacama desert," *Renewable Energy*, vol. 127, pp. 871–882, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.05.039.

[109] J.-F. Lelièvre, E. Cabrera, B. Hladys, N. Pinochet, V. Gutierrez, A. Marzo, P. Ferrada, D. Muñoz and A. Derrier, "Development of Ultra-Accelerated Ageing Tests for Improved Reliability and Durability of Bifacial Photovoltaic Modules in Harsh Desert Conditions," in Proc. 36th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC). Marseille, France, 2019.

[110] R. N. Dows and E. J. Gough, "PVUSA procurement, acceptance, and rating practices for photovoltaic power plants," report, University of North Texas, United States, 1995. [Online]. Available: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc621398/

[111] N. Martin Chivelet and J. M. Ruiz, "Corrigendum to "Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model" [Sol. Energy Mater. Sol. Cells 70 (1) (2001) 25–38]," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 110, p. 154, 2013, doi: 10.1016/j.solmat.2012.11.002.

[112] *IEC 60904-8: Photovoltaic devices – Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device*, 3.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission, 2014.

[113] D. Faiman, "Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 16, no. 4, pp. 307–315, 2008, doi: 10.1002/pip.813.

[114] M. Koehl, M. Heck, S. Wiesmeier, and J. Wirth, "Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 7, pp. 1638–1646, 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2011.01.020.

[115] G. Bardizza, E. Salis, and E. D. Dunlop, "Power matrix of OPV mini-module under steady conditions of temperature and irradiance at large-area solar simulator," *Solar Energy*, vol. 204, pp. 542–551, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.04.067.

[116] T. Huld, R. Gottschalg, H. G. Beyer, and M. Topič, "Mapping the performance of PV modules, effects of module type and data averaging," *Solar Energy*, vol. 84, no. 2, pp. 324–338, 2010, doi: 10.1016/j.solener.2009.12.002.

[117] T. Huld *et al.*, "A power-rating model for crystalline silicon PV modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 12, pp. 3359–3369, 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2011.07.026.

[118] C. Monokroussos, X. Y. Zhang, M. Schweiger, D. Etienne, S. Liu, A. Zhou, V. Feng, Y. Zhang and C. Zou, "Energy rating of c-Si and mc-Si commercial PV modules in accordance with IEC 61853-1,-2,-3 and impact on the annual yield," in Proc. 33rd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-47-7 pp. 1438 - 1444. Amsterdam, Netherlands, 2017.

 P. Vourlioti, T. Huld, A.M. Gracia Amillo, M. Norton, "Geospatial Mapping of Spectral Mismatch of Multi-Junction Photovoltaic Modules Using Satellite-Retreived Spectral Irradiance Data," in Proc. 31st Eur. Photovolt.
 Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-39-6 pp. 2017 - 2021. Hamburg, Germany, 2015.

[120] M.R. Vogt, S. Riechelmann, A.M. Gracia Amillo, A. Driesse, A. Kokka, K. Maham, P. Kärhä, R.P. Kenny, C. Schinke, K. Bothe, J.C. Blakesley, E. Music, F. Plag, G. Friesen, G. Corbellini, N. Riedel-Lyngskær, R.M.E. Valckenborg, M. Schweiger, and W. Herrmann, "Interlaboratory Comparison of the PV Module Energy Rating Standard IEC 61853-3," 4BO.13.2, in Proc. 38th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC). EU PVSEC 2020, 2020.



[121] A. Driese, *PV Performance Labs Tools for Python*: GitHub repository, 2020. [Online]. Available: https://github.com/adriesse/pvpltools-python

[122] *IEC 60904-10: Photovoltaic devices - Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements*, 3.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission, 2020.

[123] C. Monokroussos, H. Müllejans, Q. Gao, and W. Herrmann, "I-V translation procedure for higher accuracy and compliance with PERC cell technology requirements," 4AV.2.19, in Proc. 38th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC). EU PVSEC 2020, 2020.

[124] *IEC 60891 (Draft) Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics.*, 3.0^{th ed.,} International Electrotechnical Commission.

[125] S. Ransome and J. Sutterlueti, "A Systematic Comparison of 12 Empirical Models Used for Energy Yield Predictions vs PV Technology," in Proc. 33rd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-47-7 pp. 1445 - 1450. Amsterdam, Netherlands, 2017.

[126] W. Herrmann, S. Zamini, F. Fabero, T. Betts, N. van der Borg, K. Kiefer, G. Friesen, H. Müllejans, H.-D. Mohring, M.A. Vazquez, D. Fraile Montoro, "PV Module Output Power Characterisation in Test Laboratories and in the PV Industry - Results of the European PERFORMANCE Project," in Proc. 25th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-26-4 pp. 3879 - 3883. Valencia, Spain, 2010.

[127] E. Salis, D. Pavanello, M. Field, U. Kräling, F. Neuberger, K. Kiefer, C. Osterwald, S. Rummel, D. Levi, Y. Hishikawa, K. Yamagoe, H. Ohshima, M. Yoshita, and H. Müllejans, "Improvements in world-wide intercomparison of PV module calibration," *Solar Energy*, vol. 155, pp. 1451–1461, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.07.081.

[128] C.W. Hansen, K.A. Klise, J.S. Stein, Y. Ueda, K. Hakuta, "Calibration of Photovoltaic Module Performance Models Using Monitored System Data," in Proc. 29th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-34-5 pp. 3472 - 3476. Amsterdam, Netherlands, 2014.

[129] C. W. Hansen, K. A. Klise, and J. S. Stein, "Data requirements for calibration of photovoltaic system models using monitored system data," in *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist 2015*, doi: 10.1109/PVSC.2015.7356173, pp. 1–5.

[130] *Method of testing to determine the thermal performance of solar collectors*, ASHRAE-93-1986/XAB, 1.0^{th ed.}, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 1985.

 B. H. King and C. D. Robinson, "Simplifying methods to calibrate the Sandia Array Performance Model," in 6th PV Performance Modeling Workshop. [Online]. Available: https://www.osti.gov/servlets/purl/1404812
 Freiburg, Germany, 25 October, 2016.

[132] R. Singh *et al.*, "Analyses of measurement parameters for laboratory characterization of the operating temperature coefficients of CI(G)S PV modules," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2016, pp. 3095–3099.

[133] Internationale Elektrotechnische Kommission, "Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating: IEC 61853-1," Geneva, International standard / International Electrotechnical Commission, 2011.

[134] Internationale Elektrotechnische Kommission, "Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating: IEC 61853-4," Geneva, International standard / International Electrotechnical Commission IEC 61853-4, 2018.

[135] N. Martín and J. M. Ruiz, "A new model for PV modules angular losses under field conditions," *International Journal of Solar Energy*, vol. 22, no. 1, pp. 19–31, 2002, doi: 10.1080/01425910212852.



[136] Internationale Elektrotechnische Kommission, "Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating: IEC 61853-2," Geneva, International standard / International Electrotechnical Commission IEC 61853-2, 2016.

[137] Internationale Elektrotechnische Kommission, "Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating: IEC 61853-3," Geneva, International standard / International Electrotechnical Commission IEC 61853-3, 2018.

[138] W. Heydenreich, B. Müller, and C. Reise, "Describing the World With Three Parameters: A New Approach to PV Module Power Modelling," 2008, doi: 10.4229/23RDEUPVSEC2008-4DO.9.4.

[139] A. Driesse, *PV Performance Labs Tools for Python*. GitHub repository. [Online]. Available: https://github.com/adriesse/pvpltools-python

[140] A. Driesse and J. Stein, "From IEC 61853 power measurements to PV system simulations: SANDIA REPORT," Sandia National Laboratories, 2020.

[141] *IEC 61724-1: Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring*, 1.0, International Electrotechnical Commission, 2017.

[142] J. Blakesley, J. Holder, G. Koutsourakis, S. Douglas, R. Abrams, F. Mukadam, D. Ruiz, "Spectrally corrected albedo," in bifiPV workshop. Amsterdam, Netherlands, 2019.

[143] C. Monokroussos, Q. Gao, X.Y. Zhang, E. Lee, Y. Wang, C. Zou, L. Rimmelspache, J. Bonilla Castro, M. Schweiger, W. Herrmann, "Rear-side spectral irradiance at 1 sun and application to bifacial module power rating," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 28, no. 8, pp. 755–766, 2020, doi: 10.1002/pip.3268.

[144] M.R. Vogt, T. Gewohn, K. Bothe, C. Schinke, R. Brendel, "Impact of Using Spectrally Resolved Ground Albedo Data for Performance Simula-tions of Bifacial Modules," in Proc. 35th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-50-7 pp. 1011 - 1016. Brussels, Belgium, 2018.

[145] G.C. Eder, K. Knöbl, L. Maul, M. Aichinger, G. Peharz, W. Nemitz, K.A. Berger, "Designed BIPV-Elements with Printed Front-Glass: Simulation and Experimental Evaluation of the Effect of Printing on the Electrical Performance," (Poster), in Proc. 33rd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-47-7. Amsterdam, Netherlands, 2017.

[146] R.M.E. Valckenborg, B. Van Aken, "IEC61853-Matrix Analysis of PVPS Task 15 BIPV Round-Robin for more than one year at seven test sites over the world," in Proc. 37th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC). (Virtual), 2020.

[147] G.C. Eder, G. Peharz, P. Bonomo, E. Saretta, F. Frontini, C. Polo, H. Wilson, J. Eisenlohr, N. Martin, S. Karlsson, N. Jakica, A. Zanell, D. Moor, T. Kolas and M. Van der Donker, "Coloured BIPV : Market, Research and Development," Report IEA-PVPS T15-07: 2019, International Energy Agency, Feb. 2019.

[148] SMART-FLEX project, *Demonstration at industrial scale of the FLeXible manufacturing of SMART multifunctional photovoltaic building elements: Project ID: 322434*. Funded by European Union's Seventh Framework Programme, 2013-2016. Accessed: November 29th, 2017. [Online]. Available: http://www.smartflexsolarfacades/

[149] CONSTRUCT PV Project, *Constructing buildings with customizable size PV modules integrated in the opaque part of the building skin: FP7-ENERGY-2011-2, ENERGY.2011.2.1-4*. European Union Seventh Framework Programme (FP7), 2013-2018. [Online]. Available: www.constructpv.eu

[150] Sunage SA, *Photovoltaic PV module manufacturer Werbsite*. Accessed: November 14th, 2020. [Online]. Available: www.sunage.ch

[151] Hochschule Luzern. Envelopes and Solar Energy Competence Centre within the Hochschule Luzern. Accessed: November 14th, 2020. [Online]. Available: https://www.hslu.ch/en/lucerne-school-of-engineering-



architecture/research/competence-centers/gebaeudehuelleundingenieurbau/gebaeudehuelle/envelopes-and-solar-energy/

[152] G.C. Eder, K. Knöbl, L. Maul, M. Aichinger, G. Peharz, W. Nemitz, K.A. Berger, "Designed BIPV-Elements with Printed Front-Glass: Simulation and Experimental Evaluation of the Effect of Printing on the Electrical Performance," 6BV.3.57, in Proc. 33rd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-47-7. Amsterdam, Netherlands, 2017.

[153] F. Frontini, P. Bonomo, E. Saretta, T. Weber, J. Berghold, "Indoor and Outdoor Characterization of Innovative Colored BIPV Modules for Façade Application," in Proc. 32nd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-41-8 pp. 2498 - 2502. Munich, Germany, 2016.

[154] C. Tzikas, R.M.E. Valckenborg, M. Dörenkämper, M.N. van den Donker, D. Duque Lozano, A. Bognar, R. Loonen, J.L.M. Hensen, W. Folkerts, "Outdoor Characterization of Colored and Textured Prototype PV Façade Elements," in Proc. 35th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC), ISBN: 3-936338-50-7 pp. 1468 - 1471. Brussels, Belgium, 2018.

[155] G. Peharz and A. Ulm, "Quantifying the influence of colors on the performance of c-Si photovoltaic devices," *Renewable Energy*, vol. 129, pp. 299–308, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.05.068.

[156] R. R. Molinero, G. Friesen and M. Caccivio, "ENHANCE: Next Generation Photovoltaic Performance: Final Report," University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland (SUPSI), Canobbio, Nov. 2019. [Online]. Available: https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=64923&Load=true

[157] B. Mahiylov, M. Bliss, T.R. Betts, R. Gottschalg, "Uncertainty in photovoltaic module energy rating," in *Proceedings of the 11th Photovoltaic Science, Applications and Technology Conference C97 (PVSAT-11).* [Online]. Available: https://hdl.handle.net/2134/17784

[158] S. Pfenninger and I. Staffell, "Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data," *Energy*, vol. 114, pp. 1251–1265, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.08.060.

[159] M. Šúri, T. A. Huld, and E. D. Dunlop, H. A. Ossenbrink, "Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries," *Solar Energy*, vol. 81, no. 10, pp. 1295–1305, 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.12.007.

[160] W. van Sark, T. Nordmann, L. Clavadetscher, and M. Green, *Analysis of Long-Term Performance of PV Systems Different Data Resolution for Different Purposes*2014.

[161] B. Kausika, P. Moraitis, and W. van Sark, "Visualization of Operational Performance of Grid-Connected PV Systems in Selected European Countries," *Energies*, vol. 11, p. 1330, 2018, doi: 10.3390/en11061330.

[162] J. Leloux, L. Narvarte, and D. Trebosc, "Review of the performance of residential PV systems in France," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.10.018.

[163] J. Leloux, L. Narvarte, and D. Trebosc, "Review of the performance of residential PV systems in Belgium," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.145.

[164] N. H. Reich, B. Mueller, A. Armbruster, W. G. J. H. M. van Sark, K. Kiefer, and C. Reise, "Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic?," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 20, no. 6, pp. 717–726, 2012, doi: 10.1002/pip.1219.

[165] P. Moraitis, B. Kausika, N. Nortier, and W. van Sark, "Urban Environment and Solar PV Performance: The Case of the Netherlands," *Energies*, vol. 11, p. 1333, 2018, doi: 10.3390/en11061333.

[166] Y.-M. Saint-Drenan, L. Wald, T. Ranchin, L. Dubus, and A. Troccoli, "An approach for the estimation of the aggregated photovoltaic power generated in several European countries from meteorological data," *Advances in Science and Research*, vol. 15, pp. 51–62, 2018, doi: 10.5194/asr-15-51-2018.



[167] S. Killinger *et al.*, "On the search for representative characteristics of PV systems Data collection and analysis of PV system azimuth, tilt, capacity, yield and shading," *Solar Energy*, vol. 173, pp. 1087–1106, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.08.051.

[168] J. Bright and S. Killinger, "Corrigendum to "On the search for representative characteristics of PV systems: Data collection and analysis of PV system azimuth, tilt, capacity, yield and shading" [Sol. Energy 173 (2018) 1087-1106]," *Solar Energy*, vol. 187, pp. 290–292, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.04.030.

[169] M. Matlab, *Fit probability distribution object to data - MATLAB fitdist.* [Online]. Available: https:// nl.mathworks.com/help/stats/fitdist.html#btu538h-distname

[170] W.G.J.H.M. van Sark, L. Bosselaar, P. Gerrissen, K. Esmeijer, P. Moraitis, M. van den Donker, G. Emsbroek, "Update of the Dutch PV Specific Yield for Determination of PV Contribution to Renewable Energy Production: 25% More Energy!," in *Proc. 29th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. (EUPVSEC)*, pp. 4095–4097.

[171] G. Friesen and W. Herrmann, G. Belluardo, B. Herteleer, J. Sutterlütti A. Driesse, K, Emery,
 M.Schweiger, "Photovoltaic Module Energy Yield Measurements: Existing Approaches and Best Practice: IEA
 PVPS T13-11," Report IEA-PVPS T13-12:2018, International Energy Agency, Paris, France, 2018.

[172] J. Bonilla Castro, "Electrical Stability of PV Modules Operating in Various Open-Air Climates," Master Thesis, Colgone University of Applied Sciences (TH Kön), Cologne, Germany, 2016.

[173] D. C. Jordan and S. R. Kurtz, "Thin-film reliability trends toward improved stability," in *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2011, pp. 827–832.

[174] C. Radue and E.E. van Dyk, "Degradation analysis of thin film photovoltaic modules," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 404, no. 22, pp. 4449–4451, 2009, doi: 10.1016/j.physb.2009.09.011.

[175] K. Kirtikara, "Lessons learnt from using PV standalone systems to provide a better quality of life for rural people," 4-3, 2004.

[176] DEDE, "Thailand PV status report 2018: Department of Alternative Energy Development and Efficiency," Ministry of Energy, 2019.

[177] Ministry of Energy, "PDP: National Electricity Generation Development Plan: VER 2018-2580," Ministry of Energy, Thailand, 2018. [Online]. Available: https://www.egat.co.th/images/businessop/PDP2018-apr2019.pdf

[178] A. Limmanee, N. Udomdachanut, S. Songtrai, S. Kaewniyompanit, Y. Sato, M. Nakaishi, S. Kittisontirak, K. Sriprapha, and Y. Sakamoto, "Field performance and degradation rates of different types of photovoltaic modules: A case study in Thailand," *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 12–17, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.088.

[179] Y. Sangpongsanont, C. Limsakul, M. Seapan, B. Muenpinij, T. Chenvidhya, C. Jiva-cate, D. Chenvidhya, and K. Kirtikara, "Long-Term Monitoring of a Small Residential Rooftop Pv Gird-Connected System in Thailand," in *23rd Photovoltaic Science and Engineering Conf.*

[180] Y. Sangpongsanont, D. Chenvidhya, S. Chuangchote, M. Seapan, K. Kirtikara, P. Parinya, C. Limsakul, T. Chenvidhya, and B. Muenpinij, "Thirteen-year Long-term Monitoring and Reli-ability of PV Module Degradation in Thailand," in *26th Photovoltaic Science and Engineering*.

[181] *IEC 61215-1-1: Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1-1: Special requirements for testing of crystalline silicon photovoltaic (PV) modules*, 1.0, International Electrotechnical Commission, 2016.

[182] Y. Sangpongsanont, D. Chenvidhya, S. Chuangchote, and K. Kirtikara, "Corrosion growth of solar cells in modules after 15 years of operation," *Solar Energy*, vol. 205, pp. 409–431, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.05.016.



[183] M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K. A. Berger, K. Kato, T. Friesen, H. Liu, M. Van Iseghem, J. Wohlgemuth, D. Miller, M. Kempe, P.H., F. Reil, N. Bogdanski, W. Herrmann, C. Buerhop-Lutz, G. Razongles, Friesen, G, "Review of Failures of Photovoltaic Modules: Report IEA-PVPS T13-01:2014," IEA Report Photovoltaic Systems Programme, International Energy Agency.



부록 1 모델링 검증 데이터세트

이 부록 1은 결정질실리콘 모듈의 측정 데이터를 포함한 일부 데이터 파일을 기술한다. 목적은 비교를 위해 일년간의 실제 옥외 데이터와 함께 모듈의 에너지수율을 계산하는데 필요한 모든 입력데이터를 포함하는 오픈소스 데이터세트를 제공하는 것이다. 데이터세트는 "PV Performance Modelling Collaborative" 웹사이트에서 구할 수 있다[54].

데이터세트는 2 부분으로 나누어져 있는데, 다음과 같은 항목을 포함한다.

- A. 모듈 특성분석 데이터
 - Pmax, Isc, Voc 매트릭스
 - 온도계수 α, β 와 δ
 - 분광응답 곡선
 - 각도 손실 곡선
 - 열적 계수 U₀ 와 U₁

B. 일 년간의 실제 작동 데이터 (5 분 간격)

- I- 곡선으로부터 추출한 P_{max}, I_{sc}, V_{oc}
- 모듈 온도 T_{mod}
- 면내 조사강도 G_{poa}
- 수평면 조사강도 Ghor
- 확산 조사강도 G_{diff}
- 주위온도 T_{amb}
- 풍속 ws

모듈 특성분석

IEC 61853-1:2011[3] 과 IEC 61853-2:2016 [4]에 따른 모듈 특성분석은 ISO 17025-인정 시험소인 SUPSI PVLab 에서 수행한다. 단일 측정의 불확도는 데이터 파일에 들어 있다. 특성분석 전에 모듈은 안정화시킨다.

여러 수준의 조사강도(100~1100 W/m²)와 온도(15°C~75°C)에서의 I-V 곡선은, 조사강도 조정용으로 다양한 중성밀도(neutral density) 필터와 온도 제어 목적의 열 박스를 갖춘 Class A+A+A+ PASAN IIIB 솔라 시뮬레이터로 측정한다.

I-V 곡선의 분광 불일치 교정용으로 사용된 분광응답은 동일한 솔라 시뮬레이터로 측정하는데, 다만 광원 앞에 파장 360~1200 nm 사이에 28개의 협대역통과(narrow bandpass) 필터를 설치한다.

입사각(AOI) 의존성 측정은 동일한 장치를 사용하였는데, 솔라 시뮬레이터 앞에서 모듈을 0~85° 범위로 회전시키면서 그리고 단일 셀에 대한 I_{sc}의 변화를 얻기 위해 하나의 단일 셀을 가리면서 측정한다. 접근방식은 Herrmann 등이 개발하고 검증한 비파괴 절차를 따른다[43].



열적 계수(U₀ 와 U₁)는 최대출력점 트랙커가 장착된(MPPT) 오픈 랙 위에서 옥외 측정한 다. 모듈온도 (T_{mod})는 풍속(ws), 주위온도(T_{amb}) 및 면내 조사강도(G_{poa})와 동시에 5 초 간격으로 모니터링한다.

모듈 에너지수율의 측정

모듈의 에너지수율은 일년간 모니터링한다. I-V 곡선은, 모듈온도(T_{mod}), 조사강도와 함께 5분 간격으로 기록한다. 다음의 조사강도 값들을 측정한다: 수평면 글로벌 (G_{hor}), 확산 조사강도 (G_{diff}), 면내 글로벌 (G_{poa})과 분광 조사강도 (G_{spec}). 면내 조사강도는 교정된 Kipp&Zone CMP21 일사량계와 EKO MS-710/712 (350-1700nm) 분광복사계로 측정한다. 풍속(ws)과 풍향(wd), 주위온도(T_{amb})와 습도(hum)는 에너지수율 시험 스탠드 가까이에 있는 기상 타워를 통해 별도로 모니터한다.



부록 2 영어-한글 용어 비교

accredited	인정받은
air mass (AM)	에어매스
albedo	알베도
alternating current (ac)	교류
ambient air temperature (T _{AMB})	주위 공기온도
ambient temperature	주위 온도
amorphous silicon (a-Si)	비정질실리콘
angle of incidence (AOI)	입사각
angular	각도
average photon energy	포톤 평균에너지
azimuth	방위각
balance of system (BOS)	주변장치
beam	직달 (direct)
bifacial	양면형
bifaciality coefficient	양면형 계수
bilinear interpolation	이중선형 내삽법(보간법)
bill of materials (BOM)	자재명세서, 원단위
blueshift	단파장이동
browning	갈변
building-integrated photovoltaic (BIPV)	건물일체형 태양광
calibration	교정
capital expenditures (CAPEX)	설비투자
characterization	특성분석
clear sky	청명
climate-specific energy rating (CSER).	기후 특성에 따른 에너지등급
coloured module	컬러 모듈
correction	보정
crystalline silicon (c-Si)	결정질실리콘
cumulative distribution function (CDF)	누적분포함수



current at maximum power point (IMPP)	최대출력점에서의 전류
current voltage characteristic (I-V)	전류-전압 특성
damp heat	고온고습
degradation rate	열화율
delamination	박리
device under test (DUT)	시험 대상 소자
diffuse	확산, 산란
direct current (DC)	직류
direct normal irradiance (DNI)	직달 법선면 조사강도
dislocation	전위
effective irradiance	유효 조사강도
electroluminescence (EL)	전계발광
elevation angle	고도각
encapsulant	봉지재
energy yield	에너지수율
equivalent	등가
equivalent irradiance	등가 조사강도
external quantum efficiency (EQE)	외부양자효율
extreme value distribution	극단값 분포
failure	불량
feed-in tariff	발전차액
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
green public procurement (GPP)	녹색 공공조달
grid-connected	계통연계
half space	반공간
heterojunction (HTJ)	이종접합
in plane	면내(面內)



incident angle modifier (IAM)	입사각 수정기
indium tin oxide (ITO)	주석 첨가 인듐 산화물
insolation	일조량
International Electrotechnical Commission (IEC)	국제전기기술위원회
International Energy Agency (IEA)	국제에너지기구
irradiance	조사강도
irradiation	조사량
iso lines	등치선
Key Performance Indicator (KPI)	핵심 성능 지수
Köppen-Geiger climate zone (s) (KG/KGC)	KG
Köppen-Geiger-photovoltaic (KGPV)	KGPV
levelized cost of electricity (LCOE)	균등화 발전단가
light soaking	광조사, 광흡수
linear performance loss analysis (LPLA)	선형 성능 손실분석
linear regression	선형회귀
maximum power point (MPP)	최대출력점
measurement	측정
mechanistic performance model (MPM)	기계론적 성능 모델
metastability	준안정성
meteorology	기상학
multicrystal silicon (mc-Si)	다중결정 실리콘
multi-junction	다중접합
multivariate	다변수
nominal module operating temperature (NMOT)	공칭 모듈작동온도
off-grid system	독립형 시스템
off-sun	차광시, 햇빛이 가려진
on-sun	조사시, 햇빛 아래
open-circuit voltage	개방전압
performance ratio (PR)	성능비
photon flux density	포톤 플럭스 밀도
photovoltaic (PV)	태양광
photovoltaic climate zone (PVCZ)	태양광 기후대



plane of array (POA)	어레이면
Plataforma Solar del Desierto de Atacama (PSDA)	아타카마 사막의 솔라 플랫폼
power output	출력 산출량, 출력 생산량
practices	관행
precipitation	강수량
preconditioning	전처리
primary equation	기본적인 방정식
probability density distribution	확률밀도분포
probability density function (PDF)	확률밀도함수
PV module's efficiency (ETA)	태양광모듈 효율
pyranometer	일사량계
pyrheliometer	직달일사량계
radiation	일조량
real-time data (RTD)	실시간 데이터
regression analysis	회귀 분석
return on investment	투자수익률
root mean squared error	평균 제곱근 오차
Sandia Array Performance Model (SAPM)	샌디아 어레이 성능모델
scheme	스킴
shading	음영
short-circuit current	단락전류
sky temperature	천공온도
snail trails	달팽이 자국
soiling	오염
spectral irradiance	분광 조사강도
spectral mismatch (SMM)	분광불일치
spectral response (SR)	분광응답
spectrum shift	스펙트럼 변화(이동)
stand-alone systems	독립형 시스템
standard	규격
standard day	표준일
standard mounting conditions (SMC)	표준 설치조건



temperature coefficient	온도계수
textile module	직물 모듈
thermal transients	열적 과도상태
thermal voltage	열 전압
thermocouple (TC)	열전대
time series	시계열
total ozone column (TOC)	총 오존 칼럼
tracker	트랙커, 추적기
translation equations	변환 방정식
transposition	전위
ultraviolet (UV)	자외선
uncertainty	불확도
view angle	화각
visualization	시각화
wind speed	풍속
yield	수율
zenith angle	천정각

