



열려 있는

수직 양면 태양광 시스템 효율성에 대한 종합 연구: 영국 사례 연구

가디르 바드란* & 마흐무드 디미시

이 논문은 태양 에너지 기술에서 중요한 혁신을 나타내는 획기적인 수직 장착 양면 태양광(VBPV) 시스템에 대한 최초의 포괄적인 연구를 제시합니다. 수직 방향과 고효율 헤테로 접합 셀을 사용하는 것이 특징인 VBPV 시스템은 기존 태양 전지 패널 설치에서 벗어나는 새로운 개념을 도입합니다. 영국 요크 대학교에서 1년 이상 수행한 실증 연구는 이 선구적인 기술에 대한 첫 번째 평가를 제공합니다. 이 연구에 따르면 VBPV 시스템은 수직 장착 모노페이셜 PV(VMPV) 시스템과 기존의 기울어진 모노페이셜 PV(TMPV) 시스템보다 에너지 출력 측면에서 상당히 우수한 것으로 나타났습니다. 주요 발견 사항에는 VMPV 시스템보다 일일 전력 출력이 7.12%와 10.12% 증가하고, 이른 아침과 늦은 오후에는 각각 TMPV 시스템보다 26.91%와 22.88% 향상되었습니다. 계절 분석에 따르면 VMPV 시스템에 비해 봄에는 평균 11.42%, 여름에는 8.13%, 가을에는 10.94%, 겨울에는 12.45%의 전력 이득이 나타났습니다. TMPV 시스템에 비해 이러한 이득은 훨씬 더 크며 겨울에는 24.52%로 정점을 찍습니다. 이러한 결과는 VBPV 시스템이 다양한 환경 조건에서 태양 에너지를 활용하는 데 있어 탁월한 효율성을 보여주며, 태양 에너지 기술에서 유망하고 지속 가능한 솔루션으로 자리매김했습니다.

약어

CFD 계산 유체 역학
DC 직류히트 이종접합
상호교차된 뒷면 접촉NREL 국가 재생 에너지 연구소
PERC 패시베이션 에미터 및 리어 셀

PERL 패시베이션 에미터 후면 국부 확산

PERT 패시베이션 에미터 후면 완전 확산

POA 배열 평면
태양광RMSE 평균 제곱근 오차
표준 테스트 조건

TMPV 기울어진 단일면 태양광

VBPV 수직 양면 태양광

VMPV 수직 모노페이셜 태양광

태양광 발전(PV) 기술은 재생 에너지 혁명의 초석이 되었으며 세계의 증가하는 에너지 수요에 대한 깨끗하고 지속 가능한 솔루션을 제공합니다.

태양광 PV는 본질적으로 태양 에너지를 활용하여 반도체 재료를 통해 직접 전기로 변환합니다. 이 기술은 전통적으로 모노페이셜 PV 모듈에 의해 지배되어 왔습니다.

태양을 향하는 단일 표면에서 햇빛을 모읍니다.

그러나 보다 효율적이고 비용 효율적인 에너지 솔루션에 대한 필요성이 커지면서 태양광 PV의 발전으로 양면 모듈3,4이 탄생했습니다. 이는 태양광 에너지 포착에 대한 새로운 접근 방식으로, 태양광 에너지 시스템의 효율성 표준을 새롭게 정의할 것을 약속합니다.

School of Physics, Engineering and Technology, University of York, YorkYO10 5DD, UK. *이메일: Ghadeer.badrان@

요크.에이씨.유크

그림 1에 나타난 바와 같이 양면 PV 모듈은 직사광선과 지면 반사 및 확산 반사도를 통해 후면에 도달하는 빛을 활용하여 전면과 후면 모두에서 태양광을 포착하도록 설계되었습니다.^{5,6}

단일면 PV 모듈과 동일한 스펙트럼 응답을 갖는 실리콘 셀에 의존함에도 불구하고 양면 모듈의 양면 설계는 주변 표면에서 반사되고 확산된 빛을 흡수하여 에너지 수율을 크게 향상시킬 수 있습니다.

이 설계는 특히 높은 지면 반사율이나 반사율을 높이기 위해 설계된 지면 피복이 있는 환경에서 특히 유용합니다.

양면 PV 모듈의 진화는 단순히 태양광 기술의 점진적인 개선 이상을 나타냅니다. 그것은 태양광 에너지가 수확되는 방식에 패러다임의 변화를 의미합니다. 단방향 광 포착에 의해 제한되는 기존의 단일면 시스템과 달리 양면 시스템은 태양 복사의 전체 스펙트럼을 활용합니다. 이는 여러 각도에서 광 흡수를 최적화하는 첨단 셀 기술과 혁신적인 패널 설계의 조합을 통해 달성됩니다. 그 결과 단위 면적당 에너지 생산이 현저히 증가하여 태양광 설비의 효율성을 극대화하는 데 중요한 요소가 됩니다.

또한 양면 PV 기술의 통합은 지속 가능한 개발을 향한 글로벌 추진과 완벽하게 일치합니다. 추가 토지가 필요 없이 태양광 설비의 전력 출력을 향상시킴으로써 양면 PV 시스템은 자원을 보다 효율적으로 사용하는 데 기여합니다. 이러한 효율성은 최적의 조건에 국한되지 않습니다. 양면 모듈은 일사량이 낮은 지역과 공간 및 조명 조건이 제한된 도시 환경을 포함하여 다양한 환경 설정^{11,12}에서 회복성을 보여줍니다.

양면 PV 모듈의 중요성은 운영상의 이점을 넘어섭니다. 이 모듈의 배치는 에너지 정책, 경제 계획 및 환경 전략에 심오한 영향을 미칩니다. 양면 PV 시스템은 태양 에너지 생성을 위한 보다 다재다능하고 강력한 솔루션을 제공함으로써 재생 에너지 원로의 전환을 가속화하고 화석 연료에 대한 의존도를 줄이며 기후 변화의 영향을 완화할 수 있습니다.

양면 PV 기술 분야에서 태양 에너지 시스템의 효율성과 적응성을 극대화하기 위해 다양한 구성이 탐구되었습니다. 여기에는 수직, 기울어진 및 기타 혁신적인 배열이 포함되어 각각 고유한 작동 특성과 응용 프로그램이 있습니다. 수직 양면 PV 시스템: 이러한 시스템은 수직 방향으로 장착된 패널을 포함합니다. 수직 양면 PV의 주요 장점은 패널의 양쪽에서 하루 종일 효과적으로 햇빛을 포착할 수 있는 능력입니다. 이 구성은 태양이 하늘에서 더 낮은 고위도에서 특히 유익합니다. 수직 시스템은 또한 먼지와 잔해물이 축적될 가능성이 낮아 유지 관리 요구 사항이 줄어듭니다. 현재 연구에 따르면 수직 양면 시스템은 공간이 제한된 도시 환경과 상당히 확산된 빛이 있는 지역에서 상당한 에너지 이득을 얻을 수 있습니다.

기울어진 양면 PV 시스템: 기울어진 시스템은 보다 전통적이며, 패널을 각도에 맞춰 설치하여 직사광선에 노출되는 것을 최대화합니다. 이 구성의 양면 패널은 지면이나 아래의 반사 표면에서 반사된 빛을 포착할 수 있습니다. 최적의 기울기 각도는 지속적인 연구 주제이며, 연구¹⁷⁻¹⁹에 따르면 기울기를 약간만 조정해도 에너지 포착이 상당히 증가할 수 있으며, 특히 지면 반사율이 높은 지역에서 그렇습니다. 마지막으로, 추적 양면 PV 시스템: 이는 패널이 방향을 조정하여 태양 경로를 따라갈 수 있는 동적 시스템입니다.²⁰ 이 추적 기능은 양면 기술과 결합되어 하루 종일 태양 에너지 포착을 극대화합니다. 연구^{21,22}에 따르면 추적 양면 시스템은 특히 직사광선이 강한 지역에서 가장 높은 수확량을 제공하여 대규모 태양광 농장에 유망한 솔루션이 됩니다.

이러한 구성은 각각 고유한 장점과 과제를 가져오며, 양면 PV 기술 분야에서 현재 연구 개발을 형성합니다. 이러한 시스템의 설계, 설치 및 운영 매개변수를 최적화하기 위한 연구가 지속적으로 진행 중입니다. 여기에는 음영을 방지하기 위한 패널 행 사이의 최적 거리²³, 빛 반사에 대한 다양한 표면²⁴ 및 재료의 효과, 성능 모니터링 및 최적화를 위한 스마트 기술 통합과 같은 요인을 조사하는 것이 포함됩니다. 더욱이 양면 PV 시스템의 성능은 음영과 주변 표면의 반사 특성에 의해 상당한 영향을 받습니다. 음영은 햇빛이 패널의 앞면과 뒷면 모두에 도달하지 못하도록 차단하여 전반적인 효율성을 낮출 수 있습니다. [25 및 26](#)에서 보고한 것과 같은 음영 및 조명에 대한 자세한 모델은 이러한 효과에 대한 포괄적인 통찰력을 제공합니다. [25](#)에서 저자는 부분 음영이

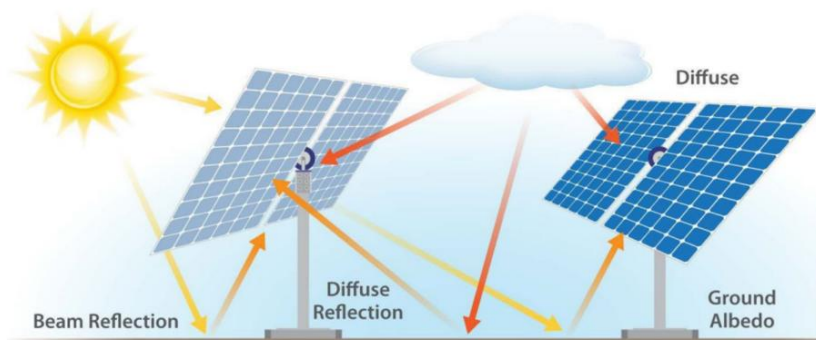


그림 1. 양면 PV 시스템 작동의 그림. 화살표는 햇빛의 다른 경로를 나타냅니다. 노란색 화살표는 앞면과 지면에 직사광선이 닿는 것을 나타내고, 주황색 화살표는 지면에서 반사되어 뒷면에 닿는 햇빛을 나타내고, 빨간색 화살표는 앞면과 뒷면 모두에서 포착된 확산된 햇빛을 나타냅니다. [11](#).

에너지 출력이 상당히 감소하는 데, 특히 고밀도 설비에서 그렇습니다. 26의 추가 연구에서는 양면 PV 성능에 대한 다양한 표면 재료와 반사율의 영향을 조사하여 반사율이 더 높은 엔지니어링 표면이 패널 후면 표면에서 포착되는 확산광을 증가시켜 에너지 수율을 높일 수 있음을 보여주었습니다. 이러한 모델은 성능을 최적화하기 위해 양면 PV 시스템을 설계하고 배치할 때 음영과 표면 특성을 고려하는 것의 중요성을 강조합니다.

양면 PV 모듈의 진화는 단순히 태양광 기술의 점진적인 개선 이상을 나타냅니다. 그것은 태양광 에너지가 수확되는 방식에 있어서 패러다임의 변화를 의미합니다. 단방향 광 포착에 의해 제한되는 기존의 단일면 시스템과 달리 양면 시스템은 태양 복사의 전체 스펙트럼을 활용합니다. 이는 고급 셀 기술과 혁신적인 패널 설계의 조합을 통해 달성되며, 이는 여러 각도에서 광 흡수를 최적화합니다. 헤테로접합(HJT) 셀은 양면 모듈에 사용되는 주요 기술이지만 n형27, 수동형 방출기 및 후면 셀(PERC)28, 수동형 방출기 후면 완전 확산(PERT)29, 수동형 방출기 후면 국소 확산(PERL)30, 상호접합 후면 접촉(IBC)30 태양 전지와 같은 다른 기술도 양면 응용 분야에 적합하여 광범위한 성공적인 결과를 보여줍니다.

이러한 기술은 단위 면적당 에너지 생산량을 현저히 증가시키는 데 기여하며, 이는 태양광 설비의 효율성을 극대화하는 데 중요한 요소입니다.

이 연구는 태양 에너지 기술의 획기적인 발전인 수직 장막 양면 광전지(VBPV) 시스템에 대한 최초의 탐사 및 출판을 소개합니다. 이 프로토타입의 고유성은 수직 방향과 고효율 헤테로접합(HJT) 셀의 사용에서 비롯되며, 이는 기존 태양 전지 패널 설정과 크게 다릅니다. 저희 연구는 경험적 접근 방식에서 선구적이며, 1년 내내 다양한 환경 조건에서 VBPV 시스템 성능에 대한 초기 실제 평가를 제공합니다. 여기에는 기존 단일면 시스템과의 비교 분석이 포함되어 양면 기술의 실질적인 효율성과 이점에 대한 새로운 통찰력을 제공합니다. 또한 이 연구는 이러한 혁신적인 시스템을 모델링하는 복잡성을 탐색하고 성능을 정확하게 예측하는 데 있어 과제를 해결하며 고급 시뮬레이션 기술의 필요성을 강조합니다.

재료 및 방법

새로운 수직 PV 양면 컨셉 디자인

이 연구는 수직으로 장착된 양면 태양광 시스템에 대한 선구적인 탐구와 평가를 제시하며, 고유한 설계와 운영 특성에 초점을 맞춥니다. VBPV 시스템은 고효율 HJT 셀을 활용하고 수직 방향으로 장착되며, 이는 기존 태양광 패널 설정과 크게 다릅니다32,33.

실험 설정에는 요크 대학교의 Physics Tower 옥상에 VBPV 시스템을 설치하는 것이 포함되었습니다(그림 2a). 이 시스템은 1000W/m²의 조도와 25°C의 주변 온도에서 최대 출력 전력이 1.5kW인 36개의 직렬 연결 PV 장치로 구성됩니다. 시스템의 위치는 주변 환경의 반사 특성을 활용하면서 햇빛에 노출되는 것을 극대화하도록 선택되었습니다. PV 모듈 아래와 주변의 지면 표면 재료는 높은 반사도로 알려진 흰색 자갈입니다. 이러한 재료 선택은 확산 반사를 향상시켜 양면 패널의 후면에서 포착되는 빛의 양을 늘리고 전체 에너지 수율을 높입니다.

이러한 설정은 시스템이 직사광선과 반사광을 모두 활용하도록 보장하여 다양한 환경 조건에 걸쳐 성능을 최적화합니다.

각 모듈 행 사이의 거리는 50cm입니다. 이 간격은 노르웨이의 Over Easy Solar AS에서 실시한 광범위한 시뮬레이션을 기반으로 결정되었으며, 음영을 최소화하고 지면 반사를 최대화하는 균형을 최적화했습니다. 이 결정은 임의적이지 않지만, 최적 거리는 모듈 높이의 함수이며 각 특정 설치에 대해 신중하게 고려해야 한다는 다른 연구 결과와 일치합니다34–36. 정격 전력 출력 외에도 시스템의 성능 특성에는 -0.29%/°C의 온도 계수와 22.5%의 변환 효율이 포함되며, 이는 다양한 환경 조건에서 VBPV 시스템의 운영 효율성과 복원력을 이해하는 데 중요합니다.

VBPV 시스템의 성능은 2023년 2월부터 2023년 12월까지 전체 연간 주기에 걸쳐 지속적으로 모니터링되었으며, 수직으로 장착된 단결정 실리콘 모노페이셜 PV(VMPV) 시스템 및 전통적인 기울어진 모노페이셜 PV(TMPV) 시스템과 비교되었습니다. 데이터는 대학의 그리드와 통합된 3kW 인버터를 사용하여 기록되었으며, 이를 통해 에너지 생산을 실시간으로 추적하고 분석할 수 있었습니다. 이 포괄적인 경험적 접근 방식은 양면 기술의 실질적인 효율성과 이점에 대한 귀중한 통찰력을 제공하며, 다양한 환경 조건에서 VBPV 시스템의 뛰어난 성능을 강조합니다.

VBPV 시스템은 공기 역학적 안정성을 평가하기 위해 전산 유체 역학(CFD) 시뮬레이션을 거쳤습니다. 시뮬레이션은 ANSYS Fluent를 사용하여 수행되었으며, k-ε 난류 모델을 사용하여 패널 주변의 공기 흐름 역학을 정확하게 포착했습니다. 경계 조건에는 최대 27m/s의 입구 풍속이 포함되어 시스템이 겪을 수 있는 극한의 기상 조건을 나타냅니다. 패널은 실제 재료 특성에 해당하는 표면 거칠기로 모델링되었으며, 패널 간 간격은 물리적 설정에 따라 50cm로 설정되었습니다.

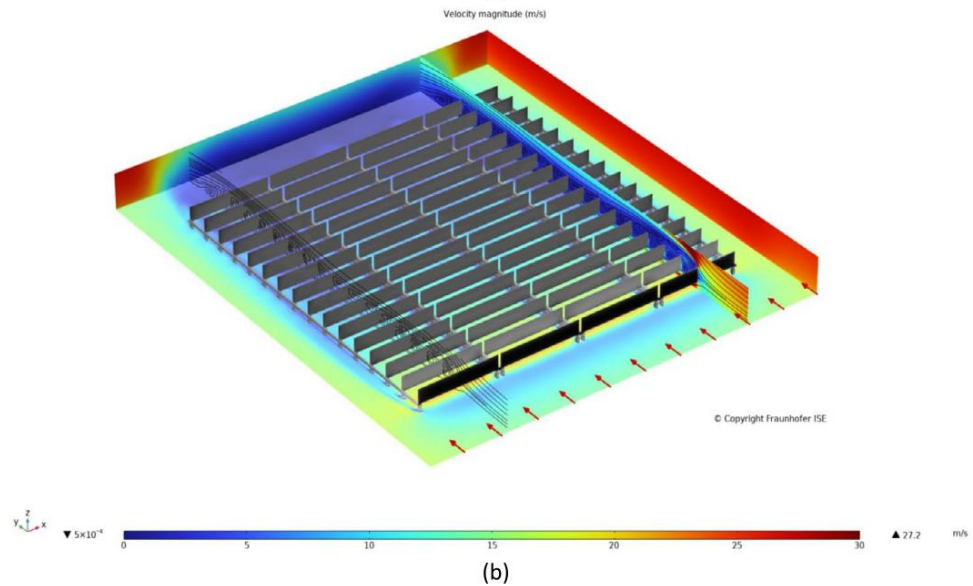
그림 2b에 표시된 CFD 시뮬레이션 결과에 따르면 VBPV 시스템은 최대 27m/s의 강한 풍속에서도 최소한의 생명력을 유지합니다. 이는 뛰어난 공기역학적 안정성을 나타내며, 이는 악천후 조건에서 설비의 내구성과 안전성을 보장하는 데 중요합니다. 이와 대조적으로, 기존의 기울어진 PV 시스템은 에어포일처럼 작용할 수 있는 경사면으로 인해 유사한 풍속에서 더 높은 생명력을 경험하는 것으로 기록되었습니다.

데이터 비교 및 분석

연구 중인 혁신적인 VBPV 시스템은 영국 요크 대학교의 물리학 타워 옥상에 전략적으로 배치되었습니다. 태양광 이득을 최적화하기 위해 남쪽으로 세심하게 배치되었습니다. 이 시스템은 생성된 전기를 직접 공급할 수 있는 3kW 인버터와 완벽하게 통합되어 있습니다.



(a)



(b)

그림 2. 이 작업에서 검토한 새로운 VBPV 시스템. (a) 이 시스템은 영국 요크 대학교의 Physics Tower 옥상에 위치해 있습니다. 지면 표면 재료는 흰색 자갈로, 반사율을 높이고 양면 패널 후면에서 포착되는 확산 반사를 증가시키기 위해 선택되었습니다. (b) 이 작업에서 검토하는 VBPV 시스템의 CFD 시뮬레이션으로, 이 시스템은 27.2m/s의 극한 풍속에서도 무시할 수 있는 생명력을 가지고 있음을 나타냅니다.

대학의 그리드. 시스템의 성능 데이터는 인버터의 온라인 플랫폼을 통해 세심하게 모니터링되고 기록되어 에너지 생산의 실시간 추적 및 분석을 보장합니다.

VBPV 시스템 설치 는 2022년 12월에 완료되었고, 공식 시운전은 2023년 1월에 실시되었습니다. 따라서 이 작업에서 제시하고 분석한 성능 데이터는 2023년 2월부터 2023년 12월 말까지의 포괄적인 연간 주기를 포함합니다. 이 데이터 세트는 다양한 계절 조건에 따른 시스템의 효율성과 에너지 출력을 평가하기 위한 견고한 기반을 제공합니다.

비교를 위한 기준을 설정하고 VBPV 시스템의 성능을 강조하기 위해, 우리는 그 데이터를 인접한 곳에 위치한 동일한 PV 용량이 1.5kW인 수직으로 설치된 다결정 실리콘 단일면 PV(VMPV) 시스템의 데이터와 병치했습니다. 이 병렬 분석은 동일한 수직 설정에서 양면 기술의 이점을 보여줍니다. 또한 비교 분석을 확장하기 위해 우리는 VBPV 시스템의 출력을 기존 타일 1.5kW 다결정 실리콘 단일면 PV 시스템(TMPV)과 비교하여 자세히 살펴보았습니다. 후자는 영국 태양광 설비에서 흔히 볼 수 있는 관례적인 45도 각도로 설치되므로 이 지역의 태양광 발전에 대한 기존 접근 방식을 나타냅니다. 이 작업에서 검토한 모든 PV 구성은 그림 3에 나와 있습니다.

VBPV와 VMPV 또는 TMPV를 비교한 것과 같이 두 PV 시스템 간의 전력 이득은 (1)을 사용하여 계산됩니다.

$$\text{전력 이득 비율} = \frac{\text{전력 출력 VBPV}}{\text{전력 출력 참조 시스템}} \times 100\% \quad (1)$$

Vertical monofacial photovoltaic



Vertical bifacial photovoltaic



Tilted monofacial photovoltaic



그림 3. 나무에서 조사한 태양광(PV) 시스템 구성의 비교.

여기서 Power Output_{VBPV}는 VBPV의 전기적 출력이고, Power Output_{Reference System}은 참조 시스템의 전기적 출력으로, VMPV 또는 TMPV가 될 수 있습니다.

결과

수직 양면 PV 대 수직 단면 PV

PV 시스템 성능 평가에서 VBPV 시스템과 VMPV 시스템 간의 비교 분석이 수행되었습니다. 그림 4a, b에 나와 있는 결과는 하루 중 일 태양 에너지 포집에 있어서 양면 기술의 효능에 대한 설득력 있는 설명을 제시합니다. 그림 4a는 24시간 동안 두 시스템의 전력 출력 패턴을 설명합니다. 주목할 점은 VBPV 시스템이 오전 5시 30분에서 오전 9시까지 이른 아침 시간에 전력 생산이 현저히 증가했으며, 양면 이득이 1.64kWh로 기록되었습니다.

이러한 추세는 고립된 사건이 아니었습니다. 유사한 급증이 오후 5시부터 오후 8시 30분까지 늦은 오후 시간대에 관찰되었으며, 1.39kWh의 추가 증가가 있었습니다. 이러한 증가는 VBPV 시스템의 총 일일 전력 출력이 24.57kWh인 반면 VMPV 시스템의 경우 23.3kWh로 1.27kWh의 증가 또는 7.87%의 개선을 나타냈습니다.

이를 보완하여, 그림 4b는 다양한 작동 조건이라고 추정할 수 있는 상황에서 VBPV 시스템의 우수한 성능을 재확인합니다. 이른 아침 시간대는 다시 한번 2.46kWh의 증가로 향상된 전력 출력을 보였고, 오후 시간대는 추가로 1.87kWh를 기여했습니다. 이러한 증가는 전체적으로 VBPV 시스템의 총 일일 전력 출력이 24.66kWh에 기여한 반면, VMPV 시스템의 경우 22.85kWh로 1.81kWh의 증가 또는 11.45%의 개선을 나타냈습니다.

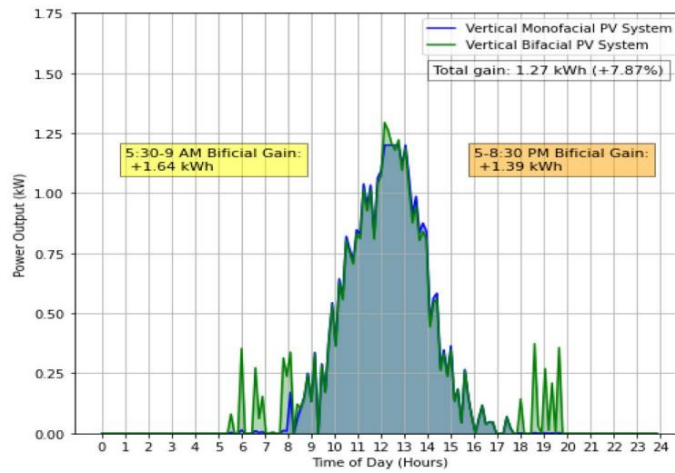
VBPV 시스템이 에너지 생성에서 VMPV 시스템을 앞지른 일관성은 양면 기술의 고유한 이점을 증명합니다. VBPV 시스템은 직접적인 머리 위 노출뿐만 아니라 반사된 빛에서도 효과적으로 햇빛을 활용함으로써, 특히 새벽과 황혼의 저각 햇빛 기간 동안 에너지 포집 능력을 증가시켰습니다. 확산 및 반사 조도를 활용하는 이러한 능력은 상당한 지상 반사도가 있는 지역^{21,24} 또는 반사 주변에 있는 설비에서 특히 유리한 효율성 차원을 추가합니다.

수직 양면 PV 대 기울어진 단면 PV

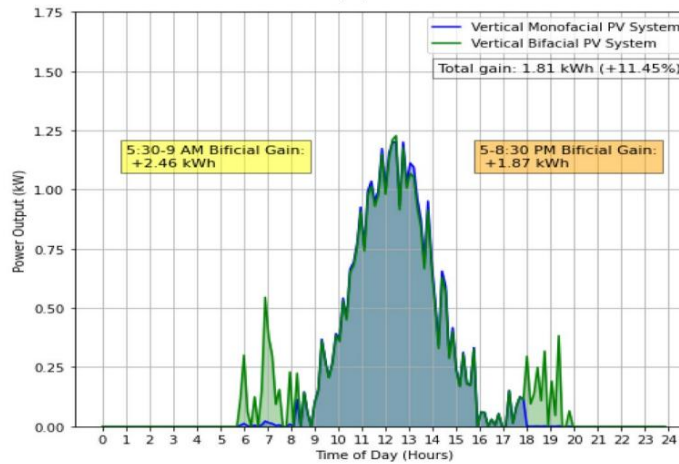
우리의 포괄적인 평가는 그림 5a, b로 확장되며, 이는 TMPV 시스템에 비해 VBPV 시스템의 향상된 성능에 대한 추가 증거를 제공합니다. 이러한 그림은 일일 전력 출력을 보여주는 핵심 데이터 집합을 나타내며 다양한 조정 조건에서 양면 기술이 제공하는 차별화된 이점을 명확하게 설명합니다.

그림 5a에서 VBPV 시스템은 이른 시간 동안 TMPV 시스템을 크게 능가하며, 오전 5시 30분에서 오전 9시 사이에 양면 이득이 3.24kWh로 기록되었습니다. 이러한 효율성 증가 추세는 하루 중 후반부까지 이어지며, 오후 5시에서 오후 8시 30분 사이에 2.59kWh의 추가 이득이 기록되었습니다. 이 경우 VBPV 시스템의 총 이득은 인상적인 4.92kWh로, 단일면 대응 제품과 비교했을 때 25.38% 향상에 해당합니다.

마찬가지로, 그림 5b는 양면 시스템의 우수한 성능을 입증합니다. 아침 시간은 양면 이득이 2.71kWh로 다시 한 번 현저한 이점을 제공합니다. 저녁 시간은 이 리더에 기여합니다.



(a)



(b)

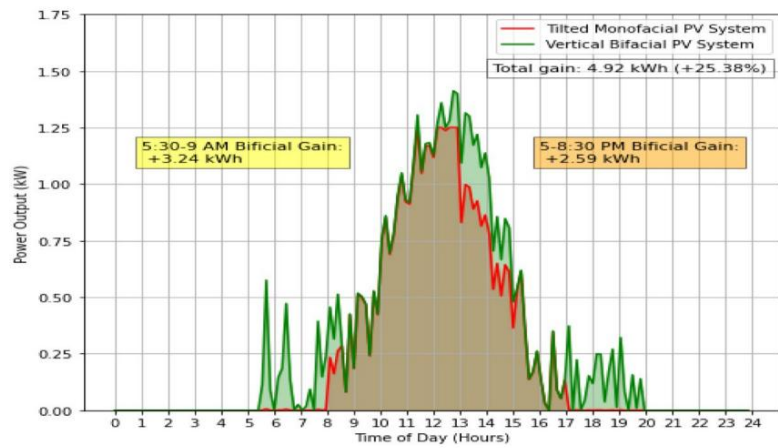
그림 4. VBPV 대 VMPV 시스템의 비교 일일 전력 출력, 이른 아침과 늦은 오후 시간의 양면 이득 강조, (a) 1일차, (b) 2일 차. 이 데이터는 2023년 4월 26일에 수집되었으며 평균 기온은 14.3°C입니다.

2.03kWh의 이득. 이러한 증가를 합치면 VBPV 시스템의 총 이득은 3.91kWh가 되며, TMPV 시스템보다 출력이 21.40% 증가했습니다.

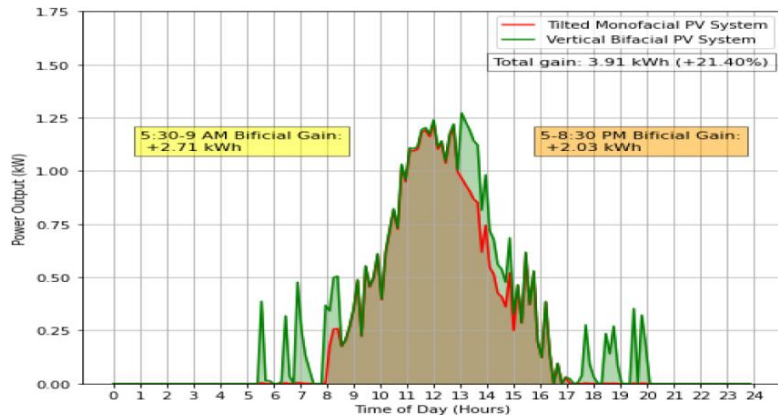
아침과 저녁의 덜 강렬한 조명 조건에서 전력 출력이 상당히 증가함에 따라 VBPV 시스템이 하루 종일 보다 일관된 에너지 공급을 제공하여 기존 태양열 시스템과 관련된 잘 알려진 정오의 발전 피크를 완화할 수 있는 잠재력이 강조됩니다. 이러한 에너지 생성 분포는 일반적인 소비 패턴과 더욱 긴밀하게 일치하여 공급과 수요의 일치를 향상시킬 수 있습니다. 예를 들어, 주거용 에너지 소비는 일반적으로 이른 아침과 늦은 오후에서 저녁 시간에 정점을 이루며, 이는 사람들이 집에 있고 요리, 난방 및 전자 장치 사용과 같은 활동에 참여하는 시간과 일치합니다³⁷. 마찬가지로 상업용 건물은 조명, HVAC 시스템 및 사무실 장비의 작동으로 인해 늦은 오전과 이른 오후에 최대 에너지 수요를 경험합니다^{38,39}. 에너지 생성을 이러한 수요 패턴에 맞춰 VBPV 시스템은 그리드 안정성을 개선하고 에너지 저장 솔루션 또는 보충 전원에 대한 의존도를 줄일 수 있습니다.

월별 전력 이득 비교

이 섹션에서는 그림 6 과 7 에 각각 나와 있듯이 VBPV 시스템의 성능 향상을 VMPV 및 TMPV 시스템과 비교하여 분석합니다. 그림 6 은 계절별로 분류된 VBPV 시스템이 VMPV 시스템에 비해 달성한 월별 전력 이득을 세부적으로 보여줍니다. 히스토그램은 전력 이득 백분율의 빈도를 자세히 설명하며, 빨간색 점선은 계절 평균을 나타냅니다. 봄에 VBPV 시스템은 11.42%의 강력한 평균 전력 이득을 보이며, 태양 각도와 일광 시간이 증가하기 시작하는 시기에 뛰어난 성능을 나타냅니다. 일반적으로 높은 일사량이 특징인 여름은 평균 8.13%의 이득을 보이는데, 이 수치는 VMPV 시스템의 높은 기존 성능을 반영하여 상대적인 이득을 줄일 수 있습니다. 가을과 겨울에는 각각 10.94%, 12.45%의 평균 이득이 나타나는데, 이는 태양 각도가 낮고 일광 시간이 짧은 계절에도 VBPV 시스템이 효과적으로 빛을 포착한다는 것을 보여줍니다.



(a)



(b)

그림 5. VBPV 대 TMPV 시스템의 비교 일일 전력 출력, (a) 1일차, (b) 2일차. 이 데이터는 2023년 5월 7일 에 수집되었으며 평균 기온은 16.7°C입니다.

그림 7을 보면 VBPV 시스템의 성능을 TMPV 시스템과 비교했습니다. 여기서 계절별 평균 전력 이득이 상당히 높아 VBPV 시스템의 고급 기능을 강조합니다. 봄에는 19.32%의 놀라운 평균 이득을 보이며 이 계절에 양면 기술이 큰 영향을 미쳤음을 보여줍니다.

여름철에는 평균 14.77%의 증가율이 나타나고 가을에는 상당한 20.27%가 증가하며 겨울철에는 평균 24.52%의 증가율을 기록합니다. 이는 VBPV 시스템 설계가 낮은 각도의 빛과 확산 반사를 포착하는 데 특히 유용하다는 사실을 뒷받침하는 데, 이는 추운 계절에 흔히 나타나는 현상입니다.

그림 6 과 7 의 데이터는 VBPV 시스템이 모든 계절에 걸쳐 VMPV와 TMPV 시스템 모두에 비해 일관되고 상당한 우월한 성능을 보인다는 것을 강조합니다. VBPV 시스템의 현재 효율성은 전면과 후면 모두에서 빛을 활용할 수 있는 이중 캡처 기능을 반영합니다.

이러한 능력은 이른 아침과 늦은 오후와 같은 확산된 빛 조건 기간 동안 관찰된 상당한 전력 이득과 가을과 겨울과 같은 태양 각도가 낮은 계절 동안 관찰된 결과에 의해 입증됩니다. 특히, VBPV 시스템이 지면과 주변 표면에서 반사된 빛을 포착하는 능력은 단일면 시스템에 비해 더 높은 평균 전력 이득으로 입증된 것처럼 향상된 성능에 크게 기여합니다. 이 이중 포착 기능은 VBPV 시스템이 직사광선과 확산된 반사광 모두에서 에너지 수확을 극대화하여 보다 일관되고 더 높은 전체 에너지 출력을 제공합니다.

이 섹션을 마무리하면서, 그림 8은 연간 주기 동안 PV 시스템에 대한 포괄적인 통계적 개요를 제공합니다. 상자 그림 시각화는 월별 전력 이득 백분율을 요약하여 간결하고 강력한 비교 분석을 제공합니다. 상자 그림은 VBPV 시스템이 일년 내내 TMPV 및 VMPV 시스템에 비해 지속적으로 더 높은 전력 이득을 보인다는 것을 보여줍니다. 이러한 이득은 각 상자의 중간값으로 정량화되며, 이는 VBPV 시스템이 월과 관계없이 설계를 활용하여 단일면 시스템에서는 접근할 수 없는 반사광에서 추가 에너지를 포착할 수 있음을 나타냅니다.

그림 8에서 중요한 관찰 결과는 VBPV 시스템이 TMPV보다 성능이 뛰어난 뿐만 아니라 VMPV 시스템보다 상당한 이점을 보인다는 것입니다. 이 구별은 양면 기술의 향상이 VMPV와 같은 보다 기존의 단일면 시스템과 비교하더라도 전력 출력에서 실질적인 이득으로 이어진다는 것을 시사하기 때문에 주목할 만합니다. TMPV 시스템에 대한 VBPV의 성능을 분석할 때 반사 이득에서 훨씬 더 두드러진 차이를 볼 수 있습니다. VBPV와 TMPV 비교를 위한 상자 그림

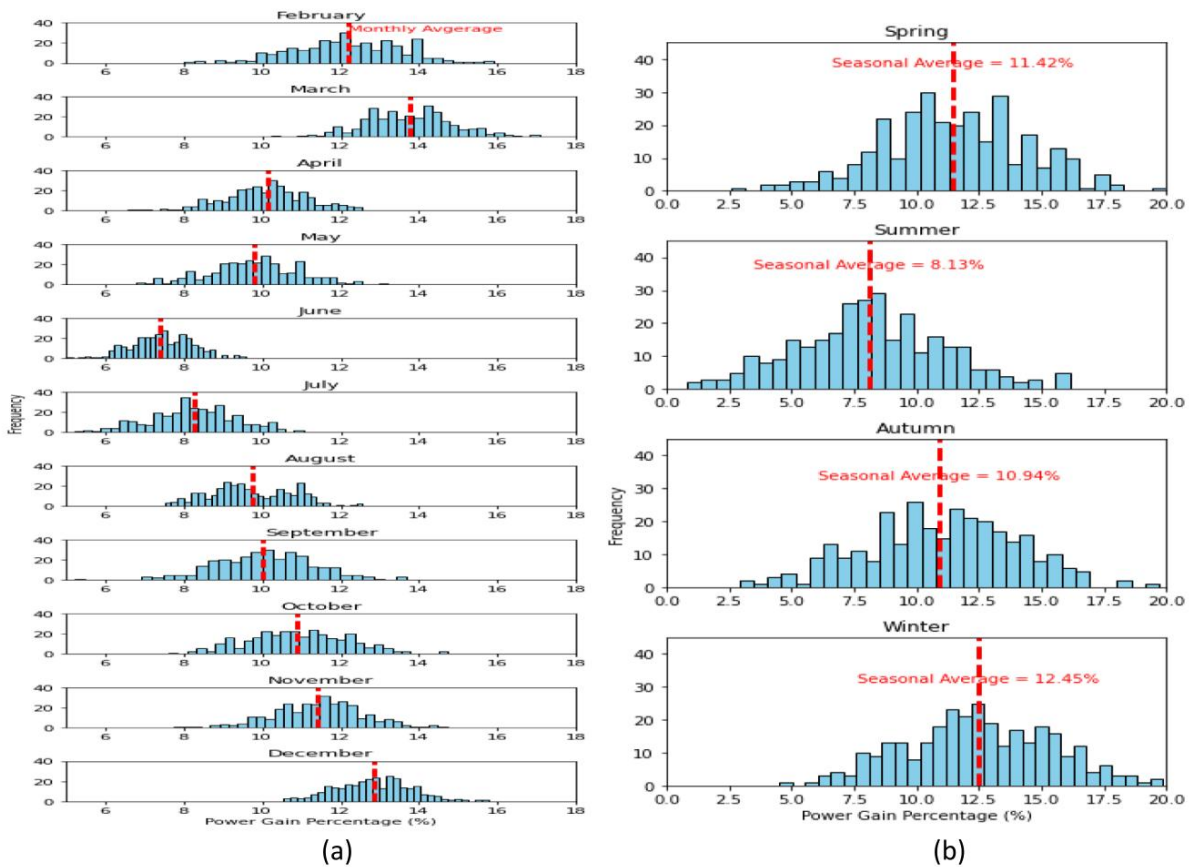


그림 6. VBPV와 VMPV 비교. (a) VBPV 대비 VMPV의 월별 전력 이득(백분율, %). (b) VBPV 대 VMPV의 전력 이득의 계절적 변화(백분율, %). 히스토그램은 전력 이득 백분율의 빈도 분포를 나타내고, 빨간색 점선은 계절적 평균 전력 이득을 나타냅니다.

백분율 축에서 더 높게 늘어나는 것은 VMPV의 첨단 기술이 없는 기존 시스템이 사용 가능한 태양 에너지를 활용하는 데 부족하다는 것을 나타냅니다. 게다가 VBPV와 VMPV 비교를 위한 상자 그림은 VMPV가 TMPV보다 효율적이지만 VBPV 시스템의 에너지 포집 증가 용량과 맞먹지 못한다는 것을 보여줍니다. 이 패턴은 모든 달에 걸쳐 일관되며 VBPV의 뛰어난 설계와 효율성을 강조합니다.

VBPV 시스템의 재정적 이점을 확인하기 위해 그림 8에서 가져온 경험적 데이터에서 파생된 월별 전력 이득 백분율을 기반으로 분석을 수행했습니다. 모든 시스템에 대한 기준으로 가정된 표준 월 에너지 출력 1500kWh를 사용하여 전력 이득 백분율을 적용하여 양면 이득으로 인해 생산된 추가 에너지를 추정했습니다. 전기 비용은 2023년 표준 가변 가격인 28.62p/kWh로 반영되었습니다. 이 가격 대는 영국의 평균 소비자를 위한 소매 전기 요금을 반영하며, 이는 지역적 차이와 시장 변동의 영향을 받습니다. 분석 결과, 그림 9에 표시된 대로 절감액에서 눈에 띄는 월별 변동이 나타났으며, 이는 일년 내내 전력 이득 백분율의 변화와 일치합니다. 절감액은 여름철에 정점에 도달했으며, 이는 일사량 증가로 인한 전력 이득 증가와 일치합니다. 반대로, 겨울철에는 계절에 따른 일사량이 감소하기 때문에 절약 효과가 줄어듭니다.

VBPV와 VMPV 시스템을 비교했을 때, 양면 기술로 포착한 추가 태양 에너지는 상당한 월간 및 누적 연간 절감액으로 이어졌습니다. 이 시스템의 전력 출력을 1500kWh로 설정했을 때, VBPV 시스템을 사용하면 VMPV 시스템에 비해 총 연간 추정 절감액이 £932.58이 되었습니다(그림 9). 이러한 절감은 VBPV 시스템이 모든 달에 걸쳐 지속적으로 추가 전력을 생산한 데 따른 것이며, 가장 큰 이득은 여름의 일사량이 가장 많은 달에 관찰되었습니다.

TMPV 시스템에 비해 VBPV 시스템은 훨씬 더 큰 경제적 이점을 보여주었습니다. VBPV 시스템의 향상된 전력 이득 백분율은 특히 겨울철에 두드러지며, 저조도 조건에서의 효율성을 강조합니다. VBPV와 TMPV 시스템을 비교할 때 연간 절감액은 주목할 만한 £1,221.13에 달했습니다. 절감액의 상당한 차이는 VBPV 시스템이 일광 수용성이 낮은 기간을 포함하여 일년 내내 태양 에너지를 보다 효과적으로 활용할 수 있는 능력을 강조합니다.

전력 이득 분석 외에도 VBPV, VMPV 및 TMPV 시스템 간의 비용 추정 비교가 제공됩니다. 분석은 초기 설치 비용, 유지 관리 비용 및 VBPV 시스템의 에너지 출력 증가에서 얻은 경제적 이점을 고려합니다. VBPV 시스템의 초기 설치 비용은 첨단 양면 기술과 필요성으로 인해 VMPV 및 TMPV 시스템보다 높습니다.

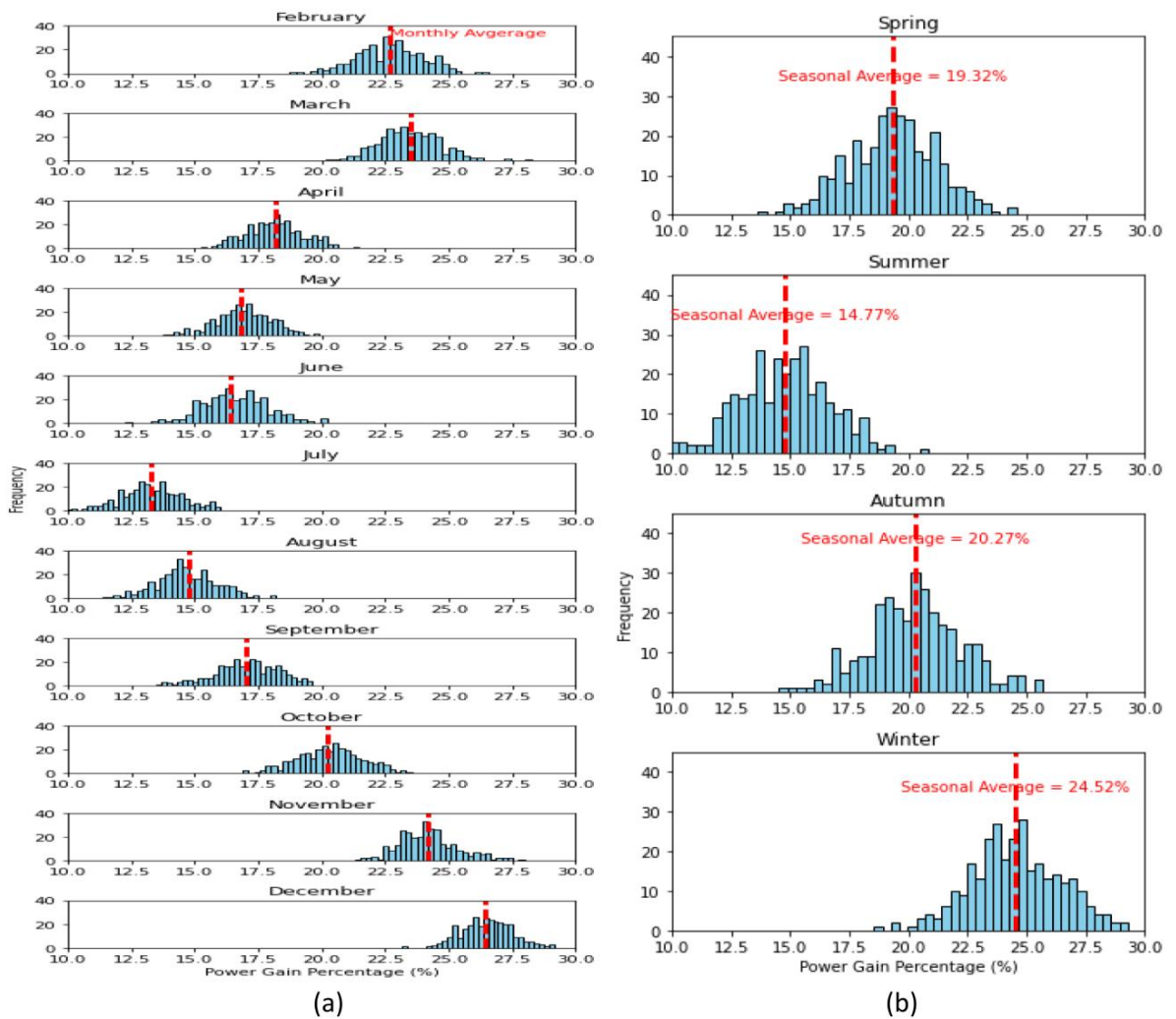


그림 7. TMPV에 비교한 VBPV. (a) TMPV에 대한 VBPV의 월별 전력 이득(백분율, %). (b) TMPV에 대한 VBPV의 전력 이득(백분율, %)의 계절적 변화. 히스토그램은 전력 이득 백분율의 빈도 분포를 나타내고, 빨간색 점선은 계절적 평균 전력 이득을 나타냅니다.

특수 장착 구조의 경우. 현재 시장 가격을 기준으로 VBPV 시스템의 kW당 추정 비용은 약 £1,200인 반면 VMPV의 경우 £1,000, TMPV 시스템의 경우 £900입니다. VBPV 시스템의 유지 관리 비용은 수직으로 장착된 패널에 먼지와 이물질이 축적되는 것을 줄여 약간 낮습니다.

포괄적인 경제적 비교를 제공하기 위해 연간 에너지 절감 및 투자 수익률(ROI)을 계산했습니다. 영국의 전기 비용은 kWh당 약 £0.2862입니다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 VBPV 시스템에서 생산되는 연간 추가 에너지는 VMPV 및 TMPV 시스템에 비해 상당한 비용 절감을 가져옵니다.

Bifacial PV 시스템 이득 대 태양 복사도

이 섹션에서는 양면 PV 시스템의 성능을 시뮬레이션하는 데 있어 직면한 모델링 과제와 성공 사례에 대한 중요한 분석을 제시합니다. PV 어레이 평면에 입사하는 태양 복사도를 나타내는 배열 평면(POA) 복사도는 이 분석에서 핵심 매개변수입니다. 그러나 관계의 완전한 그림을 제공하기 위해 양면 이득에 대한 직접 및 확산 복사도 기여도를 모두 비교합니다.

그림 10은 양면 이득과 입사광 사이의 관계를 보여주며, 확산 조도의 증가가 양면 이득의 증가와 상관관계를 보이는 명확한 추세를 보여줍니다. 이 직접적인 연관성은 조명 조건과 양면 패널의 에너지 포집 효율 간의 복잡한 상호 작용을 강조합니다. 데이터 포인트의 분산은 특히 확산광의 비율인 일사량의 가변성으로 인해 성능을 예측하는 데 어려움이 있음을 강조합니다. 이러한 통찰력은 현재 모델링 접근 방식이 이러한 가변성을 설명하기 위해 개선되어야 할 수 있음을 나타냅니다. 이 복잡성은 양면 시스템에 사용 가능한 데이터가 제한되어 모델이 성능의 미묘한 차이를 정확하게 포착하는 능력이 제한됨으로써 더욱 입증됩니다.

견고한 데이터 세트가 부족한 것은 심각한 문제이며, 양면 PV 시스템 모델의 예측 가능성과 신뢰성을 개선하기 위해 보다 포괄적인 데이터 수집이 시급히 필요하다는 것을 시사합니다.

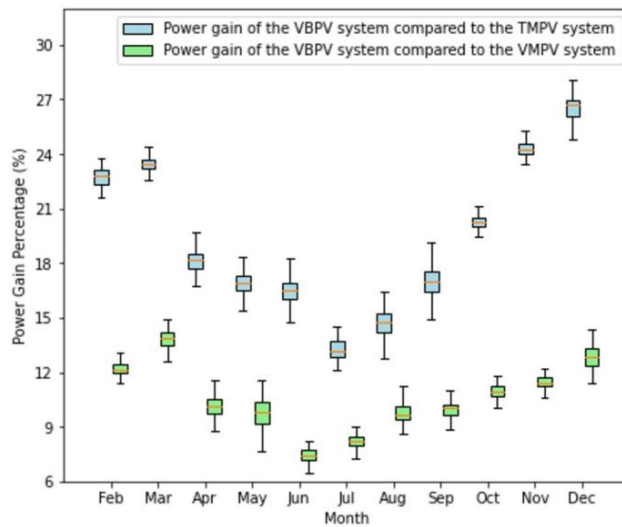


그림 8. VBPV 대 TMPV 및 VBPV 대 VMPV 시스템의 월별 전력 이득 백분율에 대한 연간 비교 분석. 상자 그림은 각 시스템의 월별 전력 이득 백분율 분포를 보여줍니다. 파란색 상자 그림은 TMPV 시스템과 비교한 VBPV 시스템의 전력 이득을 보여주고, 녹색 상자 그림은 VMPV 시스템과 비교한 VBPV 시스템의 전력 이득을 보여줍니다. 각 상자 내의 수평선은 중간값을 나타냅니다.

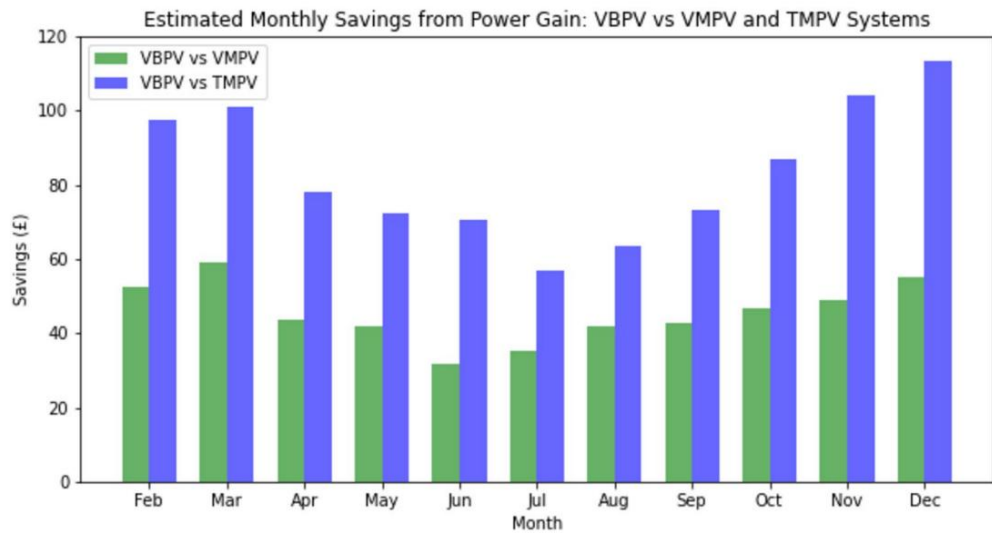


그림 9. 전력 이득을 통해 달성된 월별 절감액의 비교 추정: 1년 중 각 달에 걸쳐 VBPV 시스템 대 VMPV 시스템 (녹색) 및 TMPV 시스템(파란색)을 사용하는 경제적 이점을 나란히 비교.

그림 11a로 넘어가서, VBPV 시스템의 성능을 적절하게 포착하지 못한 SAM NREL 모델^{41,42}을 사용한 초기 모델링 시도를 살펴봅니다. 그림은 모델링된 DC 전력과 측정된 DC 전력 사이에 상당한 불일치를 나타내며, 평균 모델 오차는 37.16%, RMSE는 0.38%입니다. 예상 성능과 실제 성능 간의 이러한 차이는 햇빛의 변동성, 특히 확산 성분과 같은 중요한 요소를 통합하지 않을 때 모델의 한계를 강조합니다.

PV 시스템 성능 모델의 충실도를 높이기 위한 탐구에서, 태양광 변동성, 특히 확산 태양광과 직사광선의 비율을 통합하는 것이 핵심적인 측면으로 자리 잡았습니다. 이는 양면 PV 시스템에서 특히 중요한데, 이는 앞면과 뒷면 모두에서 빛을 포착할 수 있기 때문입니다. 확산 태양광과 직사광선의 비율은 태양에 직접 노출되지 않는 양면 패널의 뒷면에서 받는 빛의 양에 큰 영향을 미칠 수 있습니다. 이러한 이유로 그림 11b는 태양의 변동성, 특히 확산 태양광과 직사광선의 비율을 고려한 개선된 모델링 접근 방식을 제시합니다. 조정된 모델은 모델링된 DC 전력과 측정된 DC 전력 간의 상관 관계를 현저히 개선하여 평균 모델 오차를 11.55%로 상당히 줄이고 RMSE를 0.12%로 줄였습니다. 개선된 정렬은 우리의 가설을 검증합니다.

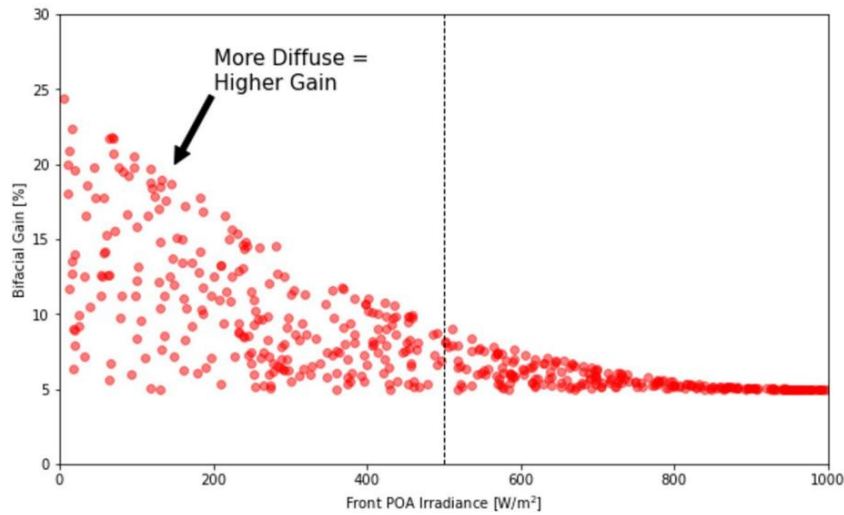


그림 10. 양면 이득과 확산 조도 간의 상관 관계. 양면 PV 시스템 성능에서 확산 광의 중요성을 강조합니다. 산점도는 데이터 포인트와 회귀선을 보여주며 추세를 나타내며 양면 PV 시스템 성능에서 확산 조도가 중요한 역할을 한다는 것을 강조합니다.

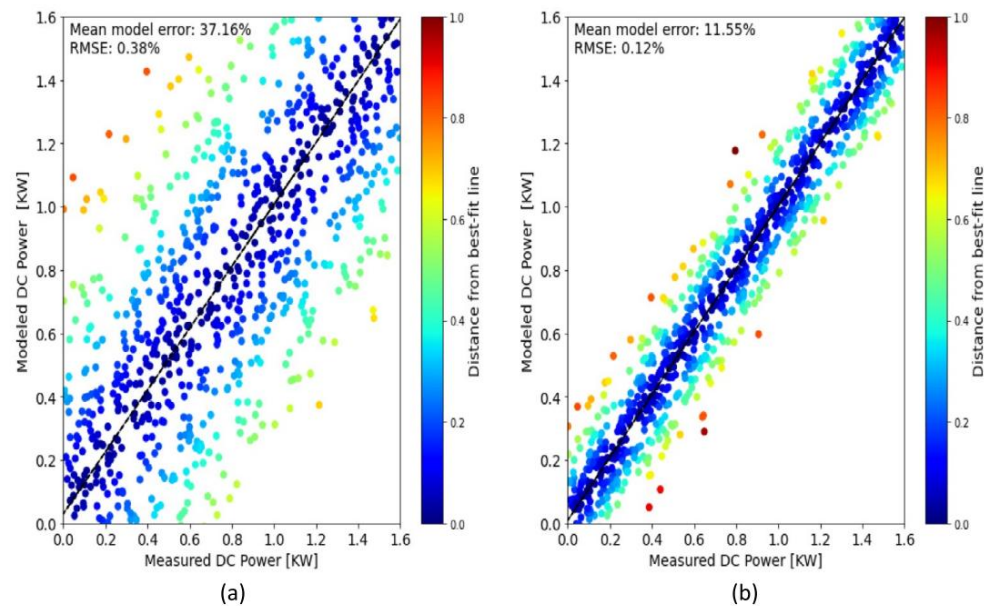


그림 11. VBPV 시스템 출력 전력 모델링(매시간 및 일별 데이터 샘플 혼합), (a) 초기 모델링 결과, (b) 조정된 햇빛 변동성을 적용한 수정된 모델링 결과.

햇빛의 역동적인 특성과 양면 패널과의 상호 작용을 통합하는 것은 패널의 성능을 정확하게 시뮬레이션하는 데 필수적입니다.

수정된 모델은 양면 이득을 설명하는 방정식 집합으로 설명할 수 있으며, 이는 일사량의 직접 및 확산 구성 요소의 함수입니다. 확산 대 직접 일사량 비율, 즉 투명도 지수는 양면 PV 시스템의 성능을 평가하는 데 중요한 매개변수입니다. 문헌에서 널리 보고된 이 비율은 직접에 반대되는 확산 일사량의 비율을 나타냅니다.

더 높은 투명도 지수는 더 많은 확산광을 의미하며, 이는 양면 시스템에 특히 유리한데, 양면 시스템은 앞면과 뒷면 모두에서 빛을 포착할 수 있기 때문입니다. 43에 따르면, 투명도 지수를 이해하는 것은 양면 PV 성능을 정확하게 모델링하는 데 필수적입니다. 이는 패널 뒷면에 사용 가능한 빛의 양에 영향을 미치기 때문입니다. 마찬가지로 44는 확산 조도 비율이 더 높은 영역은 양면 이득이 향상됨을 강조했습니다. 이러한 발견은 양면 PV 시스템의 성능 모델에 투명도 지수를 통합하는 것의 중요성을 강조합니다.

Gbifacial을 양면 이득, Idirect를 직접 조도, Idiffuse를 확산 조도 로 하면, 이중선 이득은 (2)에서 계산될 수 있습니다.

$$\text{경안면} = \frac{\text{ldirect} + \infty \times \text{Rground} + \text{ldiffuse}(1 + \beta \text{Rsky})}{\text{직접} + \text{확산}} \quad (2)$$

여기서 ∞ 는 지면 반사 조도에 대한 양면성 계수이고, Rground 는 지면 반사도이고, β 는 하늘 확산 조도에 대한 양면성 계수이고, Rsky는 확산 조도 포착에 영향을 미치는 효과적인 하늘 시야 계수를 나타내는 계수입니다. 총 전력 출력량 Pmodelled는 (3)에 의해 계산될 수 있습니다. 여기서 PSTC 는 표준 테스트 조건에서의 전력 출력이고, η conversion 은 PV 셀의 변환 효율이고, FF 는 fill 계수입니다.

$$P_{\text{modelled}} = G_{\text{bifacial}} \times \text{PSTC} \times \eta_{\text{conversion}} \times \text{FF} \quad (3)$$

확산 일광과 직사광선의 비율에 대한 모델을 교정하기 위해 총 조도에 대한 각 구성 요소의 영향을 조정하는 가중 계수를 도입합니다. 교정 프로세스에는 이러한 계수를 최적화하여 모델 출력이 측정된 데이터와 가능한 한 일치하도록 하는 것이 포함됩니다. 이는 각각 직접 및 확산 조도의 가중 계수인 wdirect 및 wdiffuse를 조정하여 달성되었습니다. 따라서 총 유효 조도를 찾기 위해 Ieffective는 (4)를 사용하여 계산됩니다. 최적화 프로세스는 모델링된 전력 출력과 측정된 전력 출력 간의 오차를 최소화하는 wdirect 및 wdiffuse의 값을 찾는 것을 목표로 합니다. 이는 비선형 최소 제곱 문제를 해결하는 데 적합한 Levenberg-Marquardt 최적화 알고리즘45을 사용하여 달성되었습니다.

$$I_{\text{효과}} = (w_{\text{직접}} \times \text{직접}) + (w_{\text{확산}} \times \text{확산}) \quad (4)$$

그림 12는 일별 및 시간별의 두 가지 시간 척도에 대한 양면 이득 대 조도 모델링 결과를 보여줍니다. 일별 데이터를 보여주는 상단 패널에서 일별 양면 이득을 연중 날짜에 대해 표시합니다. 파란색으로 표시된 Te 데이터 포인트는 계절적 추세를 따르는 것으로 보이는 일정 수준의 변동성을 표시하며, 이는 일 년 내내 태양 조도의 사인파 특성을 반영하는 것으로 보입니다. 빨간색 점선으로 표시된 다항식 모델 fit는 이 기본 추세를 포착하려고 시도합니다. Te fit는 데이터의 중심 경향을 추적하는 것처럼 보이지만 개별 데이터 포인트와 밀접하게 일치하지 않으며 평균 모델 오류 3.71%와

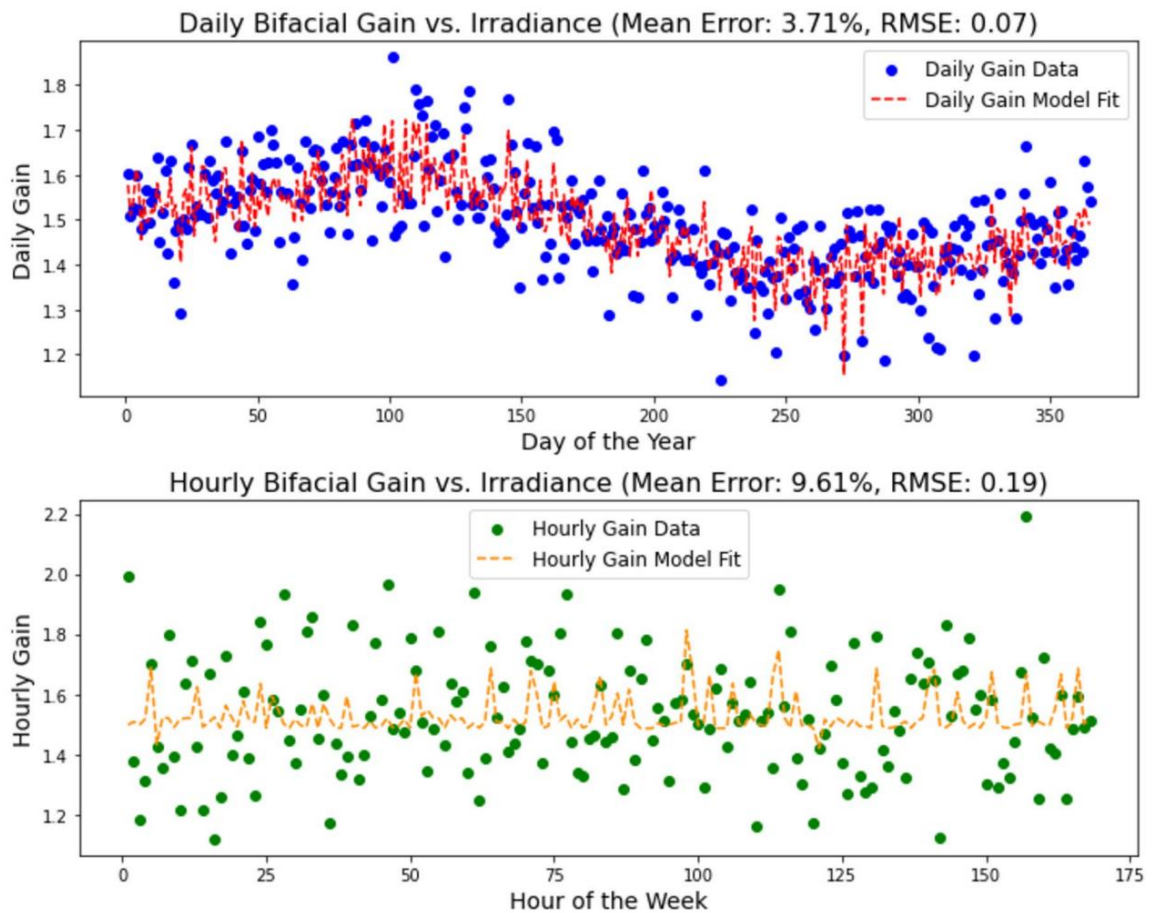


그림 12. 일별 및 시간별 양면 이득 대 일조도의 비교 분석. 상단 패널은 1년 동안의 일별 양면 이득의 변화와 모델 fit를 보여주는 반면, 하단 패널은 1주일 동안의 시간별 양면 이득을 묘사합니다. 다항식 모델 fit(일별 데이터의 경우 빨간색 점선, 시간별 데이터의 경우 주황색 점선)는 양면 PV 시스템 성능의 시간적 역학을 포착하는 데 있어 어려움을 감소합니다.

RMSE는 0.07입니다. 이러한 지표는 모델이 일반적인 패턴을 파악하는 반면, 특히 일일 변동성을 포착하는 데 있어 개선의 여지가 있음을 시사합니다.

그림 12의 하단 패널은 시간당 데이터를 표시하는데, 각 녹색 점은 주중 특정 시간의 시간당 양면 이득을 나타냅니다. 여기에서 변동성은 더 두드러지며, 하루 종일 발생하는 조도의 보다 역동적인 변화를 반영합니다. 주황색 점선으로 표시된 시간당 모델 fit는 평균 오차가 9.61%이고 RMSE가 0.19로 실제 데이터 포인트와 상당한 편차를 보입니다. 이러한 불일치는 현재 모델이 시간당 조도 변화와 해당 양면 이득을 적절하게 포착하지 못한다는 것을 나타내며, 단기 예측을 위해 보다 복잡하거나 다른 모델링 접근 방식이 필요함을 시사합니다.

논의

대규모로 VBPV 시스템을 도입하는 것의 환경적, 경제적 영향은 다면적이고 광범위합니다. 환경적으로 가장 중요한 영향은 탄소 배출량의 상당한 감소일 것입니다. 태양광은 깨끗하고 재생 가능한 자원이며, VBPV 시스템의 효율성이 향상되어 기존 태양광 솔루션에 비해 단위 면적당 더 많은 전기를 생성할 수 있습니다. 이러한 효율성 향상은 제한된 공간의 최적화가 필수적인 인구 밀도가 높거나 토지가 부족한 지역에서 매우 중요합니다. 또한 양면 패널의 양면 특성은 반사광을 포착하여 에너지 수율을 높이고 추가 토지의 필요성을 줄여 자연 서식지와 생물 다양성을 보존하는 데 중요합니다. 이러한 발견은 토지 사용 감소⁴⁷ 및 탄소 발자국 감소⁴⁸와 같은 양면 PV 시스템의 환경적 이점을 강조하는 연구와 일치합니다.

경제적 관점에서 VBPV 시스템을 도입하면 시간이 지남에 따라 상당한 비용 절감으로 이어질 수 있습니다. 초기 투자는 관련된 첨단 기술로 인해 기존 시스템보다 높을 수 있지만 VBPV 시스템의 더 높은 에너지 수율과 효율성은 장기적으로 더 낮은 비용으로 이어질 가능성이 높습니다.

최근 연구에 따르면 양면 PV 시스템은 후면에서 포착되는 추가 에너지로 인해 단일면 시스템에 비해 20~30% 더 높은 투자 수익을 제공할 수 있습니다.^{47,48} 또한 수직 설계로 인해 유지 관리 비용이 낮을 수 있으며, 먼지가 쌓이거나 잠재적인 음영 문제가 발생할 가능성이 적습니다. 이 요소만으로도 VBPV 시스템을 경제적으로 더 실행 가능하게 만들 수 있으며, 특히 노동 및 유지 관리 비용이 중요한 요소인 지역에서 그렇습니다.

이 연구의 발견은 글로벌 재생 에너지 전략에 심오한 의미를 갖습니다. VBPV 시스템의 향상된 효율성은 지속 가능한 개발에 대한 세계적 강조와 재생 에너지원으로의 전환에 대한 시급한 필요성과 잘 부합합니다. 연구는 다양한 도시 환경에서 양면 PV 시스템의 실행 가능성을 입증했으며, 제한된 공간에서도 적응성과 높은 에너지 수율을 강조했습니다⁴⁷.

예를 들어, 건물 외벽과 옥상에 양면 PV를 설치하면 상당한 에너지 생산 이점⁴⁹이 나타나 더 지속 가능한 도시 인프라로의 전환을 지원합니다. 다양한 환경 환경에서 VBPV 시스템의 잠재력을 입증함으로써 이 기술은 저탄소 경제로의 전환에 중요한 역할을 할 수 있습니다.

정책 및 계획 측면에서 이러한 발견은 정부 및 산업 리더가 투자 전략을 재고하도록 영향을 미칠 수 있습니다. 도시 계획 및 건물 설계에서 VBPV 기술 채택을 장려하는 것은 에너지 효율성 목표를 달성하기 위한 중요한 단계가 될 수 있습니다. 2018년 이후의 문헌은 양면 PV 시스템의 다양한 측면을 탐구하여 효율성, 비용 효율성 및 스마트 그리드와의 통합을 강조했습니다. 향후 연구는 이러한 발견을 검증하고 확장하기 위해 다양한 지리적 위치와 환경 조건에서 VBPV 시스템을 테스트하는 데 중점을 두어야 합니다. 또한 VBPV 시스템을 풍력이나 수력 발전과 같은 다른 재생 에너지 기술과 통합하여 보다 견고하고 회복력 있는 에너지 시스템을 만드는 것이 유익할 것입니다.

이 연구가 수행된 영국 요크의 특정 지리적 위치와 환경 조건은 VBPV 시스템 성능에 중요한 역할을 합니다. 요크는 온화한 해양성 기후를 보이며, 일년 내내 비교적 온화한 기온, 적당한 강수량, 다양한 구름 덮개가 특징입니다. 연평균 기온은 약 10°C이고, 평균 일광 시간은 겨울에는 약 5~7시간에서 여름에는 14~16시간입니다. 요크의 태양 각도는 계절에 따라 상당히 다르며, 여름 지점에는 최대 고도가 약 62도, 겨울 지점에는 최소 고도가 약 15도에 이릅니다. 이러한 기후 조건과 태양 기하학은 패널이 받는 직접 및 확산 일사량을 결정하기 때문에 VBPV 시스템의 성능에 영향을 미치는 중요한 요소입니다.

요약하자면, VBPV 시스템의 환경적, 경제적 잠재력은 상당하며, 글로벌 재생 에너지 전략에 상당한 영향을 미칠 가능성이 있습니다. 그러나 현재 연구의 한계를 인정하고 해결하는 것은 이 기술을 발전시키고 그 이점을 극대화하는 데 매우 중요합니다.

결론

VBPV 시스템에 대한 이 선구적인 연구는 태양 에너지 기술 분야에서 상당한 도약을 의미합니다. 영국 요크 대학교에서 진행된 포괄적인 1년간의 연구는 기존 태양 전지 패널 설치에서 벗어나 이 혁신적인 개념에 대한 최초의 심층적 탐구 역할을 합니다. 수직 방향과 고급 HJT 셀을 활용한 VBPV 시스템은 효율성과 에너지 출력 면에서 기존 태양 솔루션을 능가하는 뛰어난 성능을 보여주었습니다.

이 연구의 주요 결과는 VBPV 시스템이 다른 장치보다 우수한 성능을 가지고 있다는 것을 보여줍니다. 특히, 이 시스템은 VMPV 시스템보다 성능이 뛰어나서 이른 아침과 늦은 오후 시간대에 일일 전력 출력이 각각 7.12%와 10.12% 증가했습니다. 기존 TMPV 시스템과 비교했을 때 VBPV 시스템은 훨씬 더 놀라운 성과를 보였으며, 비슷한 시간대에 에너지 출력이 각각 26.91%와 22.88% 증가했습니다. 계절 분석은 시스템의 효율성을 더욱 강조하며, 평균 전력 증가율은 11.42%였습니다.

VMPV 시스템에서 봄에는 8.13%, 여름에는 10.94%, 가을에는 12.45%의 증가를 보였습니다. TMPV 시스템에 비해 이러한 증가는 겨울철에 인상적인 24.52%로 정점을 찍었습니다.

이러한 발견은 VBPV 시스템이 계절적 변화에 관계없이 태양 에너지를 효율적으로 활용하는 탁월한 능력을 강조합니다. 이 시스템은 토지 사용을 극대화할 뿐만 아니라 현대 건축 풍경과 완벽하게 통합되어 기능적 이점에 미적 가치를 더합니다. 양 쪽에서 태양 복사를 포착할 수 있는 이 시스템의 양면 기술은 에너지 수확량을 크게 높여 다양한 태양 노출과 반사 환경이 있는 지역에 강력한 솔루션이 됩니다.

결론적으로 VBPV 시스템은 지속 가능한 에너지의 미래를 위한 유망한 솔루션으로 부상합니다. 혁신적인 디자인, 뛰어난 효율성, 다양한 환경 조건에 대한 적응성은 도시와 농촌 모두에서 광범위하게 채택될 수 있는 이상적인 후보로 자리 매김합니다. 이 연구는 태양광 기술에 대한 미래 연구 및 개발을 위한 길을 열어 더 효율적이고 환경 친화적이며 건축적으로 통합된 태양 에너지 솔루션으로의 전환을 장려합니다. 이 새로운 PV 기술과 개념 설계를 탐구하는 첫 번째 논문으로서, 태양 에너지 시스템의 진화를 위한 강력한 기반을 마련하여 산업을 보다 지속 가능하고 에너지 효율적인 미래로 이끕니다.

데이터 가용성

합리적인 요청이 있을 경우, 논문의 해당 저자에게 데이터를 제공할 것입니다.

접수: 2024년 1월 25일; 승인: 2024년 7월 18일

Published online: 08 August 2024

참고문헌

1. Durusoy, B., Ozden, T. & Akinoglu, BG 양면 태양 전지 모듈 후면 표면의 태양 복사: 모델링 접근법. *Sci. Data* 10(1), 13300(2020).
2. 김, S. 등. 스펙트럼 반사율을 갖는 30% 이상의 효율 양면 4단자 페로브스카이트-이종 접합 실리콘 탠덤 태양 전지. *과학. Rep.* 11(1), 15524(2021).
3. Chen, M. et al. 건물 외피에 적용된 양면 PV 모듈의 전기 성능 개선. *에너지 빌드*. 238, 110849(2021).
4. Tina, GM, Scavo, FB, Aneli, S. & Gagliano, A. 건물 통합형의 전기 및 열 성능 평가 양면 태양광 모듈. *J. Clean. Prod.* 313, 127906(2021).
5. Marion, B. 양면 태양광 시스템 성능 추정을 위한 측정 및 위성에서 얻은 반사율 데이터. *Solar Energy* 215, 321–327(2021).
6. Alam, M., Gul, MS 및 Muneer, T. 양면 및 단면 태양광 발전의 성능 분석 및 비교 다양한 지상 반사율 조건. *Renew Energy Focus* 44, 295–316(2023).
7. Pal, SS, van Loenhout, FH, Westerhof, J., & Saive, R. (2023). 양면 반사기 이해 및 벤치마킹 광전지 수율 향상. *IEEE J. Photovolt.*
8. Tsuchida, S., Tsuno, Y., Sato, D., Oozeki, T., & Yamada, N. (2023). 태양광 모듈의 반사율 의존 양면 이득 손실 후면 지지 구조가 있는 IEEE J. Photovolt.
9. Hayibo, KS, Petsiuk, A., Mayville, P., Brown, L. & Pearce, JM 눈이 내리는 환경에서의 단면형 태양광 발전 시스템과 양면형 태양광 발전 시스템. *Renew. Energy* 193, 657–668(2022).
10. Olczak, P., Olek, M., Matuszewska, D., Dyczko, A. & Mania, T. 에너지 전환의 요소로서의 단면 및 양면 마이크로 PV 설치: 폴란드 사례. *Energies* 14(2), 499(2021).
11. Deline, CA, Ayala Pelaez, S., Marion, WF, Sekulic, WR, Woodhouse, MA, & Stein, J. (2019). 양면 PV 시스템 성능: 사실과 허구 분리(번호 NREL/PR-5K00-74090). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO(미국).
12. Li, Z. et al. 건물에 적용된 혁신적인 양면 태양광에 대한 포괄적인 수명 주기 평가 연구. *Energy* 245, 123212 (2022).
13. Valencia-Caballero, D. et al. 양면 태양광 시스템의 실험적 에너지 성능 평가 및 쿨루프 코팅의 효과. *J. Build. Eng.* 80, 108009(2023).
14. Riaz, MH, Imran, H., Younas, R. & Butt, NZ 효율적인 농업용 태양광을 위한 수직 양면 태양광 농장 최적화 시스템. *태양에너지* 230, 1004–1012(2021).
15. G. Badran, G., & Dhimish, M. (2024). 양면 대 단면 PV 시스템의 전기 성능 및 저하 추세: 영국 사례 연구. *IEEE J. Photovolt.* <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2024.3414131>.
16. Riaz, MH, Imran, H., Younas, R., Alam, MA & Butt, NZ 농업용 태양광 모듈 기술: 수직 양면 농장 대 기울어진 단면 농장. *IEEE J. Photovolt.* 11(2), 469–477(2021).
17. Riedel-Lyngskær, N. et al. 대규모 단일 모니터링 데이터에 대한 양면 태양광 시뮬레이션 소프트웨어 검증 덴마크의 축 추적기 및 고정 기술기 시스템. *응용 과학* 10(23), 8487(2020).
18. Rodrigo, PM, Mouhib, E, Fernandez, EF, Almonacid, F & Rosas-Caro, JC 대규모의 종합적인 지상 피복 분석. 스케일 고정 기술기 양면 태양광 발전소. *갱신. 지속. 에너지 Rev.* 192, 114229(2024).
19. Tahir, Z. & Butt, NZ 고정 기술기 및 추적 양면 태양광 발전 하에서 농업용 태양광 발전의 시공간적 운영의 의미 패널. *갱신. 에너지* 190, 167–176(2022).
20. Patel, MT et al. 차세대 유틸리티 규모 PV의 글로벌 분석: 양면 태양광 농장 추적. *Appl. Energy* 290, 116478(2021).
21. Rodríguez-Gallegos, CD, Gandhi, O., Panda, SK 및 Reindl, T. PV 추적기 성능: 태양 추적 대 추적 최상의 방향. *IEEE J. Photovolt.* 10(5), 1474–1480(2020).
22. Rodríguez-Gallegos, CD et al. 양면 및 추적 광전지 시스템의 글로벌 기술 경제 성능. *Joule* 4(7), 1514–1541(2020).
23. Ernst, M. et al. 옥상 태양광 발전 시스템의 양면 이득 잠재력에 대한 정확한 모델링. *에너지 컨퍼런스. 매너지*. 300, 117947(2024).
24. Jouttijärvi, S. et al. 저전압 그리드에서 태양 에너지를 극대화하기 위한 포괄적인 방법론적 워크플로: 사례 연구 북유럽 환경에서의 수직 양면 패널. *Solar Energy* 262, 111819(2023).
25. McIntosh, KR, Abbott, MD, Sudbury, BA & Meydbray, J. 불균일한 조명으로 인한 양면 모듈의 불일치 손실 1-D 추적 시스템에서. *IEEE J. Photovolt.* 9(6), 1504–1512(2019).
26. Russell, AC, Valdivia, CE, Bohémier, C., Haysom, JE 및 Hinzner, K. DUET: 3D 음영을 사용한 새로운 에너지 수율 모델 양면 태양광 시스템. *IEEE J. Photovolt.* 12(6), 1576–1585(2022).
27. Rüdiger, M. et al. 상향 변환 응용 분야를 위한 양면 n형 실리콘 태양 전지. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 128, 57–68(2014).
28. Sugiura, T., Matsumoto, S. & Nakano, N. 양면 PERC 태양 전지 설계: 벌크 및 후면 속성과 조명 조건. *IEEE J. Photovolt.* 10(6), 1538–1544(2020).

29. Rehman, AU, Nadeem, M. & Usman, M. 수동화된 방출기 및 후면 완전 확산: PERT 태양 전지-개요. 실리온 15(2), 639–649(2023).
30. Preu, R., Lohmüller, E., Lohmüller, S., Saint-Cast, P., & Greulich, JM(2020). 수동화된 에미터 및 후면 셀 - 장치, 기술 과학 및 모델링. 응용 물리학 개성판 7(4).
31. Ma, J. et al. 효율적인 저비용 대면적 양면 엇갈린 후면 접촉 태양 전지의 설계, 구현 및 손실 분석. 전면 플로팅 에미터. 태양 에너지 물질. 태양 전지 235, 111466(2022).
32. Sen, C. et al. 염화나트륨을 사용한 양면 실리콘 HJT, PERC 및 TOPCon 태양 전지의 셀 수준에서의 가속 습열 테스트. Solar Energy Mater. Solar Cells 262, 112554(2023).
33. Kopecek, R. & Libal, J. 양면 태양광 발전 2021: 현황, 기회 및 과제. 에너지 14(8), 2076(2021).
34. Hasan, A. & Dincer, I. 해상 응용 프로그램을 위한 양면 태양광 패널의 새로운 성능 평가 방법론. 에너지 컨퍼런스 매너. 220, 112972(2020).
35. Zhao, C., Xiao, J., Yu, Y. & Jaubert, JN 광선 추적 모델링을 통한 양면 HSAT 시스템의 정확한 음영 인자 및 불일치 손실 분석. Solar Energy Adv. 1, 100004(2021).
36. Ahmed, EM et al. 양면 태양광 패널에 대한 정확한 모델. 지속 가능성 15(1), 509(2022).
37. Afzal, M. 및 Jazizadeh, F. 에너지 소비 패턴을 사용하여 수요 대응을 위한 주거 부하 유연성 잠재력 사용자 세그먼트. Appl. Energy 254, 113693(2019).
38. Happle, G., Fonseca, JA & Schlueter, A. 상업용 건물 점유 프로파일의 다양성이 지역 에너지 수요에 미치는 영향 및 공급. Appl. Energy 277, 115594(2020).
39. Zhang, W. & Calautit, J. 거주 행동 및 패턴: 중국 남동부 고층 주거의 에너지 소비에 미치는 영향. Smart Energy 6, 100072(2022).
40. Lorenzo, E. 양면 PV 모델링의 역사적 기원에 관하여. Solar Energy 218, 587–595(2021).
41. Pelaez, SA, Deline, C., Marion, B., Sekulic, B., Parker, J., McDanold, B., & Stein, JS (2020). 공개적으로 이용 가능한 데이터를 사용한 상업용 양면 PV 기술의 필드 어레이 벤치마크. 2020년 제47회 IEEE 광전자 전문가 컨퍼런스(PVSC)(pp. 1757–1759). IEEE.
42. Ayala Pelaez, S., Deline, CA, Marion, WF, Sekulic, WR, & Stein, JS(2020). 양면 PV 모델링 이해: 광선 추적 및 뷰 팩터 모델(No. NREL/PR-5K00-75628). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO(미국).
43. Yin, HP et al. 양면 PV 모듈의 전기적 성능 및 에너지 수율에 대한 광학적 강화 효과. Solar Energy 217, 245–252(2021).
44. Sun, X., Khan, MR, Deline, C. & Alam, MA 양면 태양광 모듈의 최적화 및 성능: 글로벌 관점. 응용 에너지 212, 1601–1610(2018).
45. Ridha, HM et al. 태양광 모듈의 매개변수 추출을 위한 문제 공식화: 적응 감쇠 매개변수 공식을 기반으로 한 하이브리드 진화 알고리즘과 Levenberg Marquardt의 새로운 통합. Energy Convers. Manag. 256, 115403(2022).
46. Ghenai, C., Ahmad, FF, Rejeb, O. & Bettayeb, M. 향상된 건물 지붕 표면 알베도를 갖춘 양면 태양광 PV 시스템의 전력 출력 예측을 위한 인공 신경망. J. Build. Eng. 56, 104799(2022).
47. Mouhib, E. et al. 토지 이용 향상: 농업용 광전지 시스템에 양면 PV와 올리브 나무 통합. Appl. Energy 359, 122660(2024).
48. Mouhib, E., Micheli, L., Almonacid, FM 및 Fernández, EF 양면 태양광의 기본 및 응용 분야 개요. 기술: 농업용 태양광 및 수중 태양광. 에너지 15(23), 8777(2022).
49. McIntosh, KR, Abbott, MD 및 Sudbury, BA 단일 축 추적 장치의 단일면 및 양면 모듈의 최적 기술기 각도. IEEE J. Photovolt. 12(1), 397–405(2021).
50. A. Mastrucci, B. van Ruijven, E. Byers, M. Poblete-Cazenave & Pachauri, S. 주거 난방 및 냉방의 글로벌 사나리오 에너지 수요와 CO2 배출. 기후 변화 168, 1–26(2021).
51. Badran, G., & Dhimish, M. (2024). 영국 최대 태양광 발전소의 양면 PV 시스템과 단일면 PV 시스템의 비교 연구. 청정 에너지, zkae043.

감사의 말

이 연구는 "차세대 수직 장착 양면 태양 전지 패널: 개념화, 현장 테스트 및 에너지 성능 모니터링" 프로젝트에서 EPSRC IAA의 지원을 받았습니다. Over Easy Solar AS와 노르웨이 연구 위원회가 제공한 산업 협력 및 재정 지원에 감사드립니다. VBPV 시스템 설치에 귀중한 도움을 준 University of York의 전기 기술자 Richard Armitage와 수석 엔지니어 Andy White에게 특별히 감사드립니다. 또한 영국에서 이 시스템의 인수 및 자금 조달을 촉진하는 데 중요한 역할을 한 OverEasy 팀, 특히 Jørgen Wallerud와 Trygve Mongstad에게 감사드립니다.

저자 기여

두 저자 모두 원고의 구성과 내용을 논의했습니다. GB는 실험을 수행하고, 그림을 준비하고, 주요 원고 텍스트를 작성했습니다. MG는 실험 결과를 검증하고 원고를 수정했습니다. 두 저자 모두 제출 전에 원고를 승인했습니다.

자금 조달

EPSRC, 차세대 수직 장착 양면 태양광 패널: 개념화, 현장 테스트 및 에너지 성능 모니터링, 차세대 수직 장착 양면 태양광 패널: 개념화, 현장 테스트 및 에너지 성능 모니터링.

경쟁적 이해관계

저자는 이해상충이 없음을 선언합니다.

추가 정보

서신 및 자료 요청은 GB로 보내주시기 바랍니다.

재인쇄 및 허가 정보는 www.nature.com/reprints 에서 확인할 수 있습니다 .

출판자 주 Springer Nature는 출판된 지도와 기관 소속에 대한 저작권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.

오픈 액세스 이 기사는 크리에이티브 커먼즈 저작자표시 4.0 국제 라이선스에 따라 라이선스가 부여되었으며, 원저자 및 출처에 적절한 크레딧을 제공하고, 크리에이티브 커먼즈 라이선스에 대한 링크를 제공하고, 변경 사항이 있는 경우 이를 표시하는 한 모든 매체 또는 형식으로 사용, 공유, 각색, 배포 및 복제가 허용됩니다. 이 기사의 이미지 또는 기타 제3자 자료는 자료에 대한 크레딧 라인에 달리 명시되지 않는 한 기사의 크리에이티브 커먼즈 라이선스에 포함됩니다. 기사의 크리에이티브 커먼즈 라이선스에 자료가 포함되지 않았고 의도된 사용이 법적 규정에 의해 허용되지 않거나 허용된 사용을 초과하는 경우 저작권 소유자로부터 직접 허가를 받아야 합니다. 이 라이선스 사본을 보려면 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>을 방문하세요.

© Te Author(s) 2024