컬러 BIPV 시스템의 성능 추정 모델 제안

신주영¹ · 고석환² · 신우균³ · 황혜미² · 주영철⁴ · 강기환²⁺ · 장효식⁵⁺

¹충남대학교 에너지과학기술대학원, 석사과정

²한국에너지기술연구원 태양광연구실, 책임연구원

³한국에너지기술연구원 태양광연구실, 연구원

⁴한국에너지기술연구원 태양광연구실, 선임연구원

⁵충남대학교 에너지과학기술대학원, 교수

Proposal of Power Estimation Model of Color BIPV System

Shin Ju-Young¹ · Ko Suk-Whan² · Shin Woo-Gyun³ · Hwang Hye-Mi² · Ju Young-chul⁴ · Kang Gi-Hwan²⁺ · Chang Hyo-Sik⁵⁺

¹M.S. Candidate, Graduate School of Energy Science & Technology, Chungnam National University

²Principal Researcher, Solar Energy Department, Korea Institute of Energy Research

³Researcher, Solar Energy Department, Korea Institute of Energy Research

⁴Senior Researcher, Solar Energy Department, Korea Institute of Energy Research

⁵Professor, Graduate School of Energy Science & Technology, Chungnam National University

⁺Corresponding author: ghkang@kier.re.kr, hschang@cnu.ac.kr

Abstract

The Korean government is actively promoting mandatory zero energy building (ZEB) implementations to achieve its goal of reducing greenhouse gas emissions. Photovoltaic (PV) technologies are hence being applied in the construction of ZEBs, and building-integrated photovoltaic (BIPV) systems are in the spotlight. BIPV systems are presently being integrated in the building envelopes as parts of the buildings, such as facades, roofs, and windows, to produce on-site clean electricity without requiring additional space. However, the monotonous black-colored BIPV modules are not popular because they affect the aesthetics of the buildings. To mitigate this problem, studies have been conducted on colored BIPV modules to improve the aesthetics of buildings by implementing various colored components. Power estimation is an important part of judging the faults in PV systems. Therefore, this paper proposes a performance estimation model using the characteristics of color BIPV systems based on I-V curve measurements. A color BIPV and meteorological monitoring systems were installed to acquire field survey data. The goal of this study was to verify the superiority of the proposed model by comparison with the power estimated using a simulation tool. The proposed model with high-accuracy power estimations is expected to help diagnose the performance of the BIPV system.

Keywords: 건물일체형태양광(BIPV : Building Integrated Photovoltaic), 제로에너지빌딩(Zero Energy Building), 컬러 모듈(Color module), 전압-전류 곡선(I-V curve), 발전량 추정(Power estimation)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.5, pp.1-11, October 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.5.001>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 27 July 2021

Revised: 23 August 2021

Accepted: 23 August 2021

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

‘IEA (2020) World Energy Statistics and Balances’에 따르면 건물 에너지는 전 세계 에너지 소비량의 약 35%, 이산화탄소 배출량의 약 38%에 해당한다¹⁾. 우리나라는 2030년 국가 온실가스 감축 목표를 위한 정책으로 2020년부터 1000m² 이상 공공건축물을 시작으로 제로에너지빌딩 의무화를 시행하고 있다. 제로에너지빌딩(ZEB, Zero Energy Building)이란 건물이 소비하는 에너지를 줄이고 필요한 에너지는 신·재생에너지로 공급하여 에너지 소요량을 최소화하기 위해 지어진 건축물을 의미한다.

태양광 시스템은 제로에너지빌딩 건축을 위한 신·재생에너지이며, 그중 건물 일체형 태양광발전(Building Integrated Photovoltaic: BIPV) 시스템이 주목받고 있다. BIPV는 별도의 설치 부지가 필요하지 않으며 건축물의 지붕이나 유리창 등 건물 외관에 직접 적용되어 전기에너지를 생산할 수 있다. 하지만 기존 태양광 모듈의 경우 검정 단일 색상으로 건물 외관에 사용될 경우 건물의 미관을 손상시킨다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 다양한 색상을 구현함으로써 건물의 심미성을 향상시키기 위한 컬러 모듈에 대한 연구가 진행 중이다^{2,3)}. 이에 따른 BIPV의 설치가 증가함에 따라 유지 보수 및 고장 진단을 위한 BIPV 시스템 모니터링의 중요성이 대두되고 있다^{4,5)}. BIPV 시스템 모니터링에 대한 연구는 일반적으로 인버터의 출력이나 성능비(Performance Ratio)에 대한 분석이 실시되었다^{6,7)}. 그리고 BIPV 시스템의 성능 평가에 대한 연구는 시뮬레이션 프로그램을 통한 예측값과 실측값의 비교에 그치고 있다⁸⁻¹⁰⁾. 기존 사용되고 있는 시뮬레이션 프로그램의 경우 각기 다른 모듈의 특성과 설치 환경을 반영하는 데 한계가 있다. 또한 태양광 모듈은 일사량이 높아짐에 따라 F.F가 감소하는 특성이 있지만, 시뮬레이션 프로그램에서는 이러한 태양광 모듈의 특성이 반영되지 않았기 때문에 발전량 추정에서 오차가 발생한다¹¹⁾. 따라서 컬러 BIPV 모듈이 건물에 적용됨에 따라 발전량을 예측하고 고장을 진단하여 유지보수가 용이하게 하는 기술개발이 필요하다. 이에 본 논문에서는 일사량에 따른 모듈의 전압-전류 곡선 데이터를 기반으로 컬러 BIPV 시스템 출력 성능 추정 모델을 제안하고자 한다. 실증 데이터의 확보를 위해 컬러 BIPV 시스템과 기상환경 모니터링 시스템을 구축하였고, 시뮬레이션 툴을 이용한 예측 발전량과 비교함으로써 제안된 모델의 우수성을 검증하고자 한다. 제안한 발전량 추정 모델은 기상 데이터(일사량, 온도)에 따른 BIPV시스템 전압, 전류 값에 대한 예측이 가능하여 측정 발전 값과 비교할 경우 시스템 고장 및 비정상적 운전 여부 판단이 가능할 것이다.

2. BIPV 시스템

2.1 개요

모니터링을 위한 컬러 BIPV 시스템은 Fig. 1과 같으며 대전에 위치한 A 연구원 연구동의 정남향 외벽에 설치 각도 90°로 설치되었다. BIPV의 컬러는 Red, Dark Gray, Light Gray, Sky Blue로 총 네 가지 색상을 사용하였다. 기상 환경 모니터를 위해 모듈 뒤편에 TC선을 부착하여 모듈 온도를 측정하였고, 건물 옥상에 일사량계를

모듈 설치 각도와 동일한 90° 로 설치하여 경사면 일사량을 측정하였다. 기상 데이터는 CR1000 데이터 로거를 통하여 10분 평균에 해당하는 데이터를 취득하였다. 본 연구를 위한 분석 기간은 2021년 3월 16일부터 2021년 5월 26일까지로 설정하였다.

Fig. 1 Color BIPV system applied to building

2.2 시스템 구성

설치된 컬러 BIPV 모듈은 단결정 실리콘 태양전지를 사용하였으며, 컬러별로 출력 편차가 없고 전기적 특성이 동일하다. BIPV의 전기적 특성과 어레이 구성을 Table 1에 나타내었다. 컬러 BIPV 시스템에 사용된 인버터는 3.5 kW급으로 총 3대를 사용했으며, 인버터의 규격을 Table 2에 나타내었다. 3대의 인버터에 각 26장(Red 8장, Dark Gray 7장, Light Gray 11장), 28장(Dark Gray 7장, Light Gray 4장, Sky Blue 17장), 26장(Red 11장, Dark Gray 5장, Light Gray 10장)의 컬러 모듈을 직렬연결 하였고 Group1, 2, 3으로 나타내었다. 컬러 모듈의 어레이 결선은 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 The specification of color BIPV module and system

	Group 1	Group 2	Group 3
$P_{\max}$ (W)	96	96	96
I_{mpp} (A)	7.34	7.34	7.34
V_{mpp} (V)	13.25	13.25	13.25
I_{sc} (A)	7.69	7.69	7.69
V_{oc} (V)	15.53	15.53	15.53
Cell number	24	24	24
Series module number	26	28	26
Parallel module number	1	1	1
Capacity (kW)	2.50	2.69	2.50

Table 2 Inverter specification

DC	MPPT voltage range	100 V ~ 400 V
	Maximum Voltage	500 V
	Maximum current	18 A
AC	Rated power	3.5 kW
	Maximum efficiency	97% ~

Fig. 2 Color BIPV module array wiring

3. 컬러 BIPV 시스템 발전량 추정

본 논문에서는 컬러 BIPV 시스템에 대하여 일사량의 변화에 따른 발전량 추정 모델을 제안하였다. 제안하는 모델의 정확성을 검증하기 위해 PVsyst를 이용하여 발전량을 추정하고 실제 발전량 값과 비교 분석하였다. 컬러 BIPV 시스템의 발전량 추정 모델을 제안하고 정확성 검증을 위한 방법은 다음과 같다.

3.1 시뮬레이션 툴을 이용한 발전량 추정

본 논문에서는 시뮬레이션 툴을 이용하여 발전량 예측을 위해 PVsyst 프로그램을 이용하였다. PVsyst는 스위스 제네바대학교에서 개발된 태양광발전해석 소프트웨어로써 태양광발전시스템을 구성하는 요소에 대한 다양한 데이터베이스를 포함하고 여러 조건에 대한 분석이 가능하다. PVsyst는 데이터베이스에 모듈의 사양을 적용하면 입사 일사량의 변화에 따른 PV 모듈의 I-V Curve를 제공한다. PVsyst에서 제공하는 컬러 BIPV 모듈의 일사량에 따른 I-V curve는 Fig. 3과 Table 3과 같다. 온도 조건 25°C에서 일사량을 1000, 800, 600, 400, 200 W/m²로 구분하였고 발전량 추정을 위하여 일사량에 따른 MPP (Maximum Power Point) 값을 산출하였다. Fig. 4는 일사량에 대한 I_{mp} 값과 V_{mp} 값을 그래프로 나타낸 것이다. 일사량에 대한 I_{mp} 값과 V_{mp} 값을 회귀식으로 나타내었을 때 I_{mp} 의 경우 1차 함수, V_{mp} 의 경우 2차 함수로 나타낼 수 있었으며 R^2 값은 각각 1과 0.9894으로 회귀식이 매우 적합한 것으로 나타났다. PVsyst를 사용하여 일사량으로 나타낸 I_{mp} 와 V_{mp} 를 각각 식(1)과 식

(2)에 나타내었다. 식(2)에 나타낸 전압은 온도조건이 25°C인 경우에 해당되며, V_{mp} 는 온도가 상승함에 따라 감소하기 때문에 온도계수를 고려해 주어야 한다. 컬러 BIPV의 전압 온도계수는 0.3%/°C으로 식(2)에 온도계수를 고려해주면 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$I_{mp} = 0.007I_r - 0.0015 \quad (1)$$

$$V_{mp} = 1 \times 10^{-6}(I_r)^2 + 0.0015I_r + 12.711 \quad (2)$$

$$V_{mp\text{온도보정}} = (1 \times 10^{-6}(I_r)^2 + 0.0015I_r + 12.711)(1 - 0.003(T - 25)) \quad (3)$$

Fig. 3 I-V curve in PVsyst

Table 3 MPP values in PVsyst

Irradiation (W/m ²)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	P_{max} (W)	Fill factor (%)
200	1.401	12.96	18.2	78.3
400	2.806	13.17	36.9	78.8
600	4.204	13.23	55.6	78.9
800	5.601	13.25	74.2	78.7
1000	7.014	13.19	92.5	78.4

Fig. 4 I_{mp} , V_{mp} according to variation of irradiation using PVsyst

3.2 제안하는 발전량 추정 방법

본 논문에서는 실제 건물에 설치된 컬러 BIPV 모듈의 일사량에 따른 I-V curve를 측정하고 MPPT를 추정함으로써 발전량을 예측 모델을 제안하였다.

(1) 실험 방법

실제 연구동에 적용된 모듈 중 대표 모델인 RED 컬러 모듈을 PV 시뮬레이터 장비를 이용하여 I-V curve를 측정하였다. 실험에 사용된 컬러 모듈과 PV 시뮬레이터 장비를 Fig. 5에 나타내었다. 앞서 시뮬레이션 툴을 이용한 방법과 동일하게 온도 조건 $25^{\circ}C$ 에서 일사량을 200, 400, 600, 800, 1000 W/m^2 으로 구분하여 측정을 진행하였다. PV 시뮬레이터 장비는 일반적으로 STC (standard test condition) 조건($25^{\circ}C$, 1,000 W/m^2 , AM1.5)에서 측정이 이루어진다. 본 실험에서는 일사량에 변화를 주기 위하여 20, 40, 60, 80%필터를 사용하였다. 필터를 적용하지 않은 STC 조건에서 일사량 1,000 W/m^2 일 때의 I-V curve를 측정하였고 각각 20, 40, 60, 80% 필터를 사용하여 일사량 200, 400, 600, 800 W/m^2 일 때의 I-V curve를 측정하였다.

Fig. 5 Color BIPV module and PV simulator

(2) 실험 결과

PV 시뮬레이터로 측정한 일사량에 따른 I-V curve의 측정 결과는 Fig. 6과 Table 4와 같다. 발전량 추정을 위하여 각 일사량에 따른 I_{mp} 와 V_{mp} 값을 산출한 뒤 Fig. 7과 같이 그래프로 나타내었다. 일사량에 대한 I_{mp} 값과 V_{mp} 값을 회귀식으로 나타내었을 때 I_{mp} 의 경우 1차 함수, V_{mp} 의 경우 로그함수로 나타낼 수 있었으며 R^2 값은 각각 1과 0.917로 회귀식이 매우 적합한 것으로 나타났다. PV 시뮬레이터를 사용하여 컬러 모듈의 I-V curve 측정을 통해 일사량으로 나타낸 I_{mp} 와 V_{mp} 를 각각 식(4)과 식(5)에 나타내었다. 식(5)에 나타낸 V_{mp} 는 온도 조건이 25°C인 경우에 해당되며, 마찬가지로 온도계수 0.3%/°C를 고려해주면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{mp} = 0.007I_r + 0.0103 \quad (4)$$

$$V_{mp} = 0.2745 \ln(I_r) + 11.35 \quad (5)$$

$$V_{mp\text{온도보정}} = (0.2745 \ln(I_r) + 11.35)(1 - 0.003(T - 25)) \quad (6)$$

Fig. 6 I-V curve in PV simulator

Table 4 MPP values in PV simulator

Irradiation (W/m ²)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	P_{max} (W)	Fill factor (%)
200	1.397	12.76	17.8	80.9
400	2.829	13.05	36.9	80.5
600	4.224	13.16	55.6	79.7
800	5.610	13.18	73.9	79.0
1000	7.014	13.19	92.5	78.2

Fig. 7 I_{mp} , V_{mp} according to variation of irradiation in PV simulator

PVsyst에서 제공한 I-V curve와 PV 시뮬레이터로 측정된 I-V curve에서 일사량에 따른 F.F를 Fig. 8에 나타내었다. PVsyst에서 제공하는 I-V curve에서의 F.F는 일사량이 변화함에 따라 큰 차이 없이 선형적으로 나타났다. 하지만 실제 모듈을 PV 시뮬레이터로 측정한 결과 F.F는 일사량이 감소함에 따라 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 시뮬레이션 툴에서는 모듈의 일사량에 따른 F.F 특성을 반영하지 못하였기 때문에 프로그램상에서 발전량 추정 시 오류가 발생한다.

Fig. 8 Fill factor (a) in PVsyst (b) in PV simulator

3.3 실측값과 추정값 비교 분석

제안된 발전량 예측 모델의 정확성을 검증하기 위해 기상 환경 모니터 데이터에 따른 컬러 BIPV 시스템에 대하여 실제 발전량과 예측 발전량을 비교하였다. 실제 발전량은 CR1000 데이터 로거를 통하여 10분 평균 데이터로 취득하였고 예측 발전량은 일사량과 온도에 대한 전류와 전압을 이용하여 식(7)을 통해 구할 수 있다.

$$P = I \times V \quad (7)$$

이로부터 실제 발전량과 시뮬레이션 툴을 이용한 방법, 본 논문에서 제안하는 모델을 통해 추정한 발전량을 비교 분석하였다. 비교 분석을 위한 기간은 2021년 3월 16일부터 2021년 5월 26일까지로 설정하였고, 일사량이 200 W/m^2 이상 $1,000 \text{ W/m}^2$ 이하에 해당되는 시간을 대상으로 하였다. BIPV 시스템의 발전량과 예측 발전량의 정확도는 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error : RMSE)를 이용하여 분석하였다. RMSE는 표준편차를 일반화시킨 척도로서 실제값과 추정값과의 차이인 오차의 양을 나타내는 데 사용한다. RMSE는 식(8)을 통해 계산할 수 있다.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}} \quad (8)$$

1군 태양전지는 용량이 2.50 kW로 제안하는 모델을 통해 추정한 경우와 시뮬레이션 툴을 이용하여 추정한 경우 RMSE가 각각 1.120 kWh, 0.127 kWh, 2군 태양전지는 용량이 2.69 kW로 RMSE가 각각 0.232 kWh, 0.290 kWh, 3군 태양전지는 용량이 2.50 kW로 RMSE가 각각 0.138 kWh, 0.196 kWh로 산출되었다. RMSE 값의 비교는 Table 5에 나타내었다. 1,2,3군 모두 제안된 모델을 통한 추정 방법이 시뮬레이션 툴을 이용한 추정 방법보다 RMSE 값이 적은 것을 알 수 있다.

Table 5 Comparison of RMSE

RMSE (kWh)	Group 1	Group 2	Group 3
Proposed model	0.120	0.232	0.138
PVsyst	0.127	0.290	0.196

Fig. 9와 Table 6은 실제 발전량과 추정 발전량의 비교를 위해 컬러 BIPV 시스템의 Group 3에 대한 2021년 3월 16일의 실측 발전량과 PVsyst를 이용한 추정값, 제안하는 모델을 통한 추정값을 나타낸 것이다. 그 결과 실측 발전량이 가장 낮은 발전량을 나타냈으며 제안하는 모델을 통한 발전량, PVsyst를 이용한 발전량 순으로 발전량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 제안하는 모델을 통한 발전량이 실측 발전량에 더 가까운 값을 나타냈다. 따라서 본 논문에서 제안하는 발전량 추정 모델이 시뮬레이션 툴에서 발생하는 오차를 보완하여 컬러 BIPV 시스템의 발전량에 대하여 더 정확한 예측이 가능하다는 것을 검증하였다.

Fig. 9 Comparison of power

Table 6 Comparison of Power

Time	Irradiation (W/m^2)	Temperature ($^{\circ}C$)	Actual Power (kW)	Proposed model (kW)	PVsyst (kW)
09:00	294.02	20.65	0.517	0.703	0.745
10:00	481.67	32.53	0.937	1.121	1.192
11:00	614.22	41.77	1.219	1.395	1.484
12:00	702.18	47.76	1.393	1.569	1.667
13:00	723.43	51.69	1.420	1.597	1.696
14:00	709.30	52.93	1.382	1.559	1.656
15:00	638.73	50.65	1.252	1.411	1.500
16:00	501.22	44.14	0.985	1.126	1.197
17:00	331.72	34.78	0.622	0.762	0.807

4. 결론

본 논문에서는 대전에 위치한 A연 구원의 연구동 남측 벽면에 컬러 BIPV 시스템과 기상 환경 모니터링 시스템을 구축하여 2021년 3월 16일부터 2021년 5월 26일까지 실측 데이터를 취득하고 기상 환경 데이터를 통한 발전량 예측 모델을 제시하여 실측값과 비교함으로써 정확성을 검증하였다.

- (1) 기존 발전량 예측에 관한 연구는 주로 시뮬레이션 툴을 이용하여 이루어졌지만, 시뮬레이션 툴은 일사량에 따른 F.F의 특성이 반영되지 않아 발전량 예측에 오차가 발생한다.
- (2) 일사량이 감소함에 따라 증가하는 F.F의 특성을 반영하기 위하여 실제 모듈의 출력 특성을 측정하여 발전량 예측 모델을 제안하였다.
- (3) 2021년 3월 16일부터 2021년 5월 26일까지 실측 발전량과 비교 분석을 통해 제안된 발전량 예측 모델의

정확성을 검증하였으며 제안된 모델은 실측 발전량 대비 RMSE 오차가 0.163 kWh, 시뮬레이션 틀은 RMSE 오차가 0.204 kWh로 제안된 모델을 사용하면 더 정확한 성능 추정이 가능하다.

- (4) 본 논문에서 제안하는 발전량 예측 모델을 이용하면 일사량과 온도를 통해 발전량을 예측할 수 있고 이러한 기술을 이용하면 성능 추정 기반 고장진단이 가능하다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(C1-2421-03)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

REFERENCES

1. IEA, IEA, World Energy Balances and Statistics, 2020.
2. Lee, H. and Song, H. J., Current Status and Perspective of Colored Photovoltaic Modules, Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, e403, 2021.
3. Song, H. J., Crystalline Silicon Color Photovoltaic Module Technology Trend, Journal of the Korea Photovoltaic Society, Vol. 5, No. 1, pp. 38-45, 2019.
4. PVSITES Report, BIPV Market and Stakeholder Analysis and Needs, PVSITES, 2016.
5. n-Tech Research Report, BIPV Technologies and Markets 2017-2026, n-Tech, 2017.
6. Lee, H. M., Yoon, J. H., Kim, S. C., and Shin, U. C., Operational Power Performance of South-facing Vertical BIPV Window System Applied in Office Building, Solar Energy, Vol. 145, pp. 66-77, 2017.
7. Kim, H. L., Kang, G. H., Park, K. E., So, J. H., Yu, G. J., and Suh, S. J., Analysis of Performance of Balcony Integrated PV System, Journal of the Korea Photovoltaic Society, Vol. 29, No. 1, pp. 32-37, 2009.
8. Alves, A. E., dos Santos, D. F., and da Silva, J. V., Performance of Photovoltaic Systems Integrated in Buildings (BIPV): A Case Study on Campus Itaperuna of the Fluminense Federal Institute Brazil, IEEE, In 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America), pp. 1-5, 2019.
9. Kwon, O. H. and Lee, K. S., Photovoltaic System Energy Performance Analysis Using Meteorological Monitoring Data, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 38, No. 4, pp. 11-31, 2018.
10. Rai, P., Soni, A., and Kamble, R., Simulation and Analysis of Building Integrated Photovoltaic System for Different Climate Zones in India, Springer, In Advances in Clean Energy Technologies, pp. 577-588, 2021.
11. Islam, M. N., Rahman, M. Z., and Mominuzzaman, S. M., The Effect of Irradiation on Different Parameters of Monocrystalline Photovoltaic Solar Cell, IEEE, In 2014 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), pp. 1-6, 2014.