수평설치조건의 건물부착형 태양광발전시스템에 대한 장기 운영 성능평가

이효문¹ · 강은호¹ · 김동수² · 윤종호^{2*}

¹국립한밭대학교 건축공학과, 박사과정

²국립한밭대학교 건축공학과, 교수

Assessment of Long-Term Operational Performance of Building Attached PV System Installed on Horizontal Plane

Lee Hyo-Mun¹ · Kang Eun-Ho¹ · Kim Dong-Su² · Yoon Jong-Ho^{2*}

¹Ph.D. Candidate, Department of Architecture Engineering, Hanbat National University

²Professor, Department of Architecture Engineering, Hanbat National University

*Corresponding author: jhyoon@hanbat.ac.kr

Abstract

Regulations and certification systems have been installed in many building-applied renewable energy systems (BARESSs). Efforts to investigate and maintain the performance of renewable energy systems (RESSs) have been lacking from the perspective of users or facility managers. This maintenance issue has obstructed the RES from operating in terms of its original purpose. Therefore, in this study, the operation status is evaluated through a power generation performance analysis on building attached photovoltaic (BAPV) systems, which are representative BARESSs. The average performance ratio (PR) was 68.97%, with 78.42% in 2012 when monitoring started and 62.34% after 6 years. The PR continued to decline over time, with a difference of 16.07% between 2012 and 2018. In addition, the losses were 2.22%, 3.14%, 3.51%, and 22.16% over the entire period for the balance of the system (BOS), module temperature, incident angle modifier, and miscellaneous losses, respectively. Although other losses did not change over time, the miscellaneous loss was 10.43% in 2012, which increased to 29.49% in 2018. The BAPV system has experienced a continuous performance degradation since 2012. This indicates that managers have conducted no maintenance or performance surveys. Furthermore, more power can be generated by the BAPV system if maintenance is regularly conducted. The literature review has shown that a system installed for regulation or certification is not maintained, and that the facility managers are being challenged. Therefore, it is necessary to consider means to guide the maintenance points or methods applied.

Keywords: 건물부착형 태양광발전시스템(Building Attached Photovoltaic System, BAPV), 장기 운영 성능(Long-Term Operational Performance), 성능계수(Performance Ratio, PR), 수평 설치 조건(Horizontal Installation Condition), 성능손실(Performance Loss)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.4, pp.147-160, August 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.4.147>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 15 July 2021

Revised: 9 August 2021

Accepted: 9 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.

기호설명

H_i	: In-plane Irradiation (kWh/m ²)
E_A	: PV Array Output Energy (kWh)
E_f	: Energy Output from PV System (kWh)
P_0	: Array Power Ration (kW)
Y_r	: Reference Yield (kWh/kW, Hour/Day)
Y_A	: Array Yield (kWh/kW, Hour/Day)
Y_f	: Final system Yield (kWh/kW, Hour/Day)
L_C	: Array Capture Loss (kWh/kW, Hour/Day)
PR	: Performance Ratio (-)
L_{BOS}	: Balance of systems (BOS) Loss (kWh/kW, Hour/Day)
$L_{c,thermal}$	: Array Capture Loss by Module Temperature (kWh/kW, Hour/Day)
$L_{c,IAM}$	: Array Capture Loss by Incident Angle Modifier (kWh/kW, Hour/Day)
$L_{c,miscellaneous}$	: Array Capture Loss excluding $L_{c,thermal}$, $L_{c,IAM}$ (kWh/kW, Hour/Day)
R_C	: Normalized Array Current (-)
R_V	: Normalized Array Voltage (-)

1. 서론

대한민국 정부는 2030년 탄소배출 전망치 대비 약 37%를 감축 목표로 하고 있으며 건물 부문에서는 전체 감축 목표량의 약 21%에 해당하는 양을 감축 목표로 하고 있다¹⁾. 이를 달성하기 위해 ‘제로에너지건축물 의무화’, ‘건축물 에너지효율등급 인증제도’ 등을 운영하고 있다.

제로에너지건축물 인증제도의 경우 2020년을 시작으로 1,000 m² 이상 규모의 공공건축물에 대해 제로에너지건축물 인증을 의무화하는 등 제도를 본격 시행하였다²⁾. 제로에너지건축물 인증을 위해서는 3가지 조건을 모두 충족해야만 한다. 첫 번째는 건축물 에너지효율등급 1++ 이상, 두 번째는 에너지자립률 20% 이상, 세 번째는 건물에너지관리시스템 또는 원격검침 전자식 계량기 설치이다³⁾. 에너지자립률은 단위면적당 1차에너지소비량(kWh/m²·yr) 대비 단위면적당 1차에너지생산량(kWh/m²·yr)의 비율이며, 이를 20% 이상 달성해야 제로에너지건축물 인증의 최하위등급인 5등급을 인증받을 수 있다. 따라서 제로에너지건축물 인증 획득을 위해서는 신재생에너지 시스템 적용을 통한 에너지 생산이 필수적이라는 것을 알 수 있다.

제로에너지건축물 인증제도 외에 건축물에 신재생에너지 시스템 도입을 요구하는 제도는 다수 존재하며, 그 중 대표적인 제도가 공공건축물 신재생설비설치의무화 제도이다. 공공건축물 신재생설비설치의무화 제도는

기준에 부합¹하는 공공건축물에 대해 그 건축물에서 1년 동안 사용될 것으로 예상되는 에너지사용량의 일정 비율을 신재생에너지 시스템을 통해 생산할 것을 의무화하는 제도이다⁴⁾. 이 외에도 건축물 에너지효율등급 인증 제도, 에너지절약형 친환경주택의 건설기준, 녹색건축인증, 에너지성능지표 등에서 신재생에너지 시스템을 도입할 경우 가점을 주고 있으며, 각 지역의 ‘녹색건축물설계기준’²을 통해 민간건축물에도 신재생에너지 시스템을 설치하도록 하고 있다.

다양한 신재생에너지 시스템 종류 중 건축에 적용되는 신·재생에너지 시스템 유형은 태양광발전시스템(PV, Photovoltaic System), 태양열(Solar Thermal), 연료전지(Fuel Cell), 지열 등이 있다. 보통 옥상에 설치되는 건물부착형 태양광발전시스템(BAPV, Building Attached PV System)이 주로 설치되며⁵⁻¹⁰⁾, 제한적인 면적이나 주변 환경 영향으로 인해 충분한 설치가 어려운 경우 건물일체형 태양광발전시스템(BIPV, Building Integrated Photovoltaic), 지열, 연료전지 등이 설치되고 있다. 다양한 정부의 정책으로 많은 신재생에너지 시스템이 보급되었지만 적용된 신재생에너지 시스템에 대한 성능 및 유지관리 측면의 관심은 매우 부족한 상황이다.

따라서, 본 연구는 공공건축물 신재생설비설치의무화 제도를 통해 설치된 BAPV 시스템의 운영현황 및 유지관리 실태 조사를 위해 약 8년 동안의 모니터링 자료를 활용한 발전 성능 분석을 수행하였다. 또한 성능 손실 요소에 대한 상세 분석을 통해 분석 대상 시스템의 발전 성능 손실 원인에 대해 세분화하였으며, 해당 시스템의 운영현황 및 성능 측면의 유지관리 현황에 대해 평가하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 국내 설치된 수평설치조건인 건물부착형 태양광발전시스템의 장기 성능 평가 및 손실요소에 대한 상세분석을 위해 Fig. 1과 같이 연구를 수행하였다. 2012년 7월부터 2018년 12월까지에 해당하는 2,222일 중 82.22%에 해당하는 1,827일에 대한 모니터링 자료에 대한 분석을 수행하였다. 전체기간 중 누락된 395일이 분석에서 제외되었으며, 결측이나 오측이 발생하여 분석에서 제외하였다. 결측 및 오측이 발생한 원인으로는 모니터링 시스템의 오작동 및 PCS (Power Conditioning System)의 오류로 판단된다. 발전 성능 분석은 IEC 61724-1¹¹⁾에서 제안하는 성능평가 방법을 활용하였으며, 모듈의 온도 상승으로 인한 손실, 입사각 변화에 따른 손실 및 기타 손실을 분리하여 상세 분석하였다.

1 국가, 지자체 등의 공공기관이 신축, 증축 또는 개축하는 일정용도의 건축연면적 1,000 m² 이상의 건축물

2 세종, 서울, 부산, 광주 등은 지역 ‘녹색건축물설계’를 통해 신재생에너지 시스템의 도입을 유도하고 있으며, 서울의 경우 대지면적을 기준으로 태양광발전설비를 의무설치하도록 하고 있다.

❖ Monitoring Data Gathering

- Measured Period & Days
: 2012.07.01. ~ 2018.12.31. / 2,222 Days
- Analyzed Days & Ratio to Measured Days
: 1827 Days, / 82.22%

❖ Performance Analysis of the BAPV system

- Reference Yield (Irradiation)
- Array Yield (DC Power), Final Yield (AC Power)
- Capture Loss, BOS Loss

❖ Detailed Capture Loss Analysis

- Capture Loss by Thermal, Capture Loss by IAM
- Current & Voltage Analysis to identify reason of degradation

Fig. 1 Research flow

2.1 건물일체형 태양광발전시스템 개요

본 연구의 분석 대상 시스템은 제주지역의 BAPV 시스템으로 다결정 모듈을 활용하여 시스템을 구축하였다. Glass to Glass형의 232 Wp 모듈을 활용하여 시스템을 구성하였으며, 17 Series X 12 Parallel로 어레이를 구성하여 총 47.328 kWp의 용량을 갖는다. 어레이는 지하 2층, 지상 5층 규모의 건물 옥상에 별도 지지구조물을 설치한 후 지지구조물 상단에 수평으로 설치하였으며, 옥상의 바닥면과 어레이 하단까지 구조물을 설치하여 건물과 디자인적 일체화를 고려하여 설치되었다. 주변 차폐물에 의한 음영은 발생하지 않는 것으로 판단되며, 구조물에는 통기구를 형성하여 자연 환기를 통해 모듈의 온도 상승을 최소화하였다. 설치된 어레이의 모습 및 모듈, 어레이 사양은 Fig. 2 및 Table 1과 동일하다.

Fig. 2 View of the BAPV system

Table 1 Specification of PV module and PV array

Items	PV module	PV array
Nominal power [W]	232	47,328
Voltage at open circuit [V]	38.9	661.3
Current at short circuit [A]	8.15	97.8
Voltage at maximum power point [V]	30.8	523.6
Current at maximum power point [A]	7.50	90
Temperature coefficient of power [%/K]	-0.45	-0.45
Area of cell [m ²]	1.538	313.752
Array connection [series, parallel]	-	17, 12

성능 분석은 분석 대상 시스템의 모니터링 자료를 활용하였으며, 다양한 측정 자료 중 수평면전일사량, 어레이 출력, 시스템 출력, 어레이 후면 온도, 어레이 전압, 어레이 전류를 성능 분석에 활용하였다. 모니터링 항목 외에도 태양기하학 및 입사각수정계수를 활용하여 입사각 변화에 따른 손실을 산출하였다. 일사량과 어레이 및 시스템 출력은 발전 성능 분석에 활용되었으며, 어레이 후면온도, 입사각 수정계수, 어레이 전압 및 전류는 성능 손실 요소에 대한 상세분석 및 손실요소 세분화를 위해 활용되었다.

2.2 발전 성능 및 손실 요소 영향 평가

BAPV 시스템의 발전성능평가는 IEC 61724-1에서 제안하고 있는 성능평가 방법을 활용하였다. 이 성능평가 방법은 어레이에 도달한 일사량과 시스템 출력에 해당하는 교류전력(시스템 발전량) 및 설치 용량을 활용하여 시스템의 성능계수(Performance Ratio, PR)를 평가하는 방식이다.

Fig. 3¹²⁾은 IEC 61724-1에서 제한하고 있는 성능평가 방법 및 각 단계에서 발생할 수 있는 성능 손실요소를 나타낸 것이다. Y_r 은 Reference Yield로 어레이에 도달한 일사량과 표준 시험 조건의 일사량 비율로 결정되며, 어레이에 도달한 일사량을 표준 시험 조건으로 가정하여 환산한 수치이다. Y_A 와 Y_f 는 Array Yield, Final Yield로 어레이출력에 해당하는 DC발전량, 시스템 출력에 해당하는 AC발전량과 설치용량의 비율로 결정된다. 이때 PR은 Y_r 에 대한 Y_f 의 비율로서 결정된다.

태양광발전시스템은 태양에너지를 전기에너지로 변환하는 신재생에너지 기술로 태양에너지가 어레이에 도달 및 흡수되는 과정, 어레이에서 생산된 직류전기가 PCS로 전달되는 과정 및 PCS에서 직류전기가 교류전기로 변화하는 과정에서 다양한 원인으로 인해 손실이 발생하게 된다. 이를 두 단계로 나눌 수 있으며, 첫 번째 단계는 태양에너지가 어레이에 도달하여 직류전기를 생산하는 과정으로 이 때 발생된 손실을 통틀어 L_C (Capture Loss)라 한다. IEC 61724-1에서 모듈의 온도 상승 영향, 표면오염(Soiling, Dust, Contaminants) 등이 Capture Loss로 분류된다. 두 번째 단계는 어레이에서 생산된 직류전기가 PCS로 이동하여 교류전력으로 변환되는 과정으로 이때 발생된 손실을 통틀어 L_{BOS} (Balance of Systems Loss)라 한다. IEC 61724-1에서

Inverter, All wiring, Junction Boxes 등을 포함한 BOS (Balance of Systems components)에 의해 발생한 손실로 정의하고 있다.

PV System Performance Analysis Method

[IEA 61724-1 ; Photovoltaic System Performance – Part 1 : Monitoring]

$$PR(\text{Performane Ratio}) = Y_f/Y_r$$

$$Y_f + L_{BOS} + L_C = Y_r$$

$$Y_f + L_{BOS} = Y_A$$

$$\eta_A(\text{Array Efficiency}) = E_A/(H_i \times A_A)$$

$$\eta_f(\text{System Efficiency}) = E_{out}/(H_i \times A_A)$$

Fig. 3 Schematic diagram for performance analysis method and loss factor of PV system¹²⁾

본 연구에서는 성능손실요소에 대한 상세분석을 위해 L_C 에 해당하는 항목 중 온도와 입사각의 영향을 전체 L_C 에서 분리하여 평가하였다. 태양전지는 온도가 상승함에 따라 효율이 감소하는 특징을 갖고 있다. 모든 종류의 태양전지가 동일한 경향을 나타내고 있으며, 효율감소의 크기에 차이가 있을 뿐이다. 본 연구에서는 모듈의 온도상승에 의한 손실은 식(1)부터 식(4)를 활용하여 산출하였다. L_C 와 표준시험조건(25°C)을 가정한 Capture Loss ($L_{c,temp-corrected}$)를 산출한 뒤 두 값의 차를 계산하여 온도에 의한 Capture Loss ($L_{c,thermal}$)를 산출하였다.

$$L_{c,thermal} = L_C - L_{c,temp-corrected} \quad (1)$$

$$L_{c,temp-corrected} = Y_r - Y_{A,temp-corrected} \quad (2)$$

$$Y_{A,temp-corrected} = \sum_k (E_{A,k}/C_k)/P_0 \quad (3)$$

$$C_k = 1 + \gamma \times (T_{mod,k} - 25) \quad (4)$$

태양의 위치는 시시각각 변화한다. 태양의 위치변화는 모듈에 대한 태양에너지의 입사각을 변화시킨다. 모듈의 외표면 마감재에 해당하는 유리의 경우 입사각이 증가함에 따라 투과율이 감소하는 특징을 갖고, 이를 보정하기 위한 것이 입사각 수정계수(Incident Angle Modifier, IAM)이다. 보통 입사각 0° 부터 약 60° 까지는 큰 변화가 없지만, 임계각을 넘어선 입사각으로 태양에너지가 입사될 경우 투과율이 급격히 감소하여 손실이 발생된다. 이에 대한 영향을 평가하기 위해 $L_{c,IAM}$ 를 상세 분석하였으며, $L_{c,IAM}$ 는 입사각수정계수에 의해 발생되는 손실을 의미한다. $L_{c,IAM}$ 은 식(5)부터 식(7)과 태양기하학 및 입사각수정계수(Incident Angle Modifier) 모델 중 ASHRAE Model¹³⁾을 활용하여 산출하였다. 측정 일사량 중 투과율 감소에 의해 태양전지에 도달하지 못한 일사량을 산출하였으며, 표준 시험 조건의 일사량(1 kWh/m^2)를 활용하여 입사각 변화에 의한 손실을 최종적으로 산출하였다. 일사 성분 중 방향성을 갖는 직달일사(Direct Irradiance)만이 입사각수정계수에 대한 영향을 받기 때문에 수평면전일사량 중 직달일사 성분을 분리하여 적용해야 한다. 직산분리 모델(Decomposition Model)을 활용하여 직달일사량에 대한 예측이 가능하지만 본 연구에서는 직산분리 모델의 오차를 배제하기 위해 측정된 수평면전일사량을 대상으로 Y_r , $Y_{r,valid}$ 을 산출한 후 입사각수정계수에 의한 성능손실을 분석하였다. 따라서, 실제 입사각수정계수에 대한 손실은 본 연구의 결과보다 작을 것으로 예상되며, 연간 누적 전일사량 중 확산일사의 비율이 약 40% 내외인 점을 감안하면 분석결과의 절반 수준이 손실이 실제 발생할 것으로 예상된다.

$$L_{c,IAM} = Y_r - Y_{r,valid} \quad (5)$$

$$Y_{r,valid} = H_{i,valid} / G_{i,ref} \quad (6)$$

$$H_{i,valid} = H_i - H_{i,loss \text{ by IAM}} \quad (7)$$

$$L_{c,miscellaneous} = L_c - L_{c,thermal} - L_{c,IAM} \quad (8)$$

위 과정을 통해 산출된 $L_{c,temp-corrected}$, $L_{c,IAM}$ 과 L_c 를 활용하여 온도 및 입사각에 의한 손실을 제외한 기타 손실($L_{c,miscellaneous}$) 또한 산출하여 분석하였다. $L_{c,miscellaneous}$ 은 식(8)을 활용하여 산출하였다.

3. 수평설치 BAPV시스템의 발전성능 평가

3.1 연간 및 월별 발전성능

(1) 월별 발전성능

Fig. 4는 분석 대상 BAPV 시스템의 월별 Y_f , $L_{c,thermal}$, $L_{c,IAM}$, $L_{c,miscellaneous}$, L_{BOS} 분석 결과를 도식화한 것이다. 수평면 설치조건을 갖는 분석 대상 시스템은 동절기에 발전량이 낮아지며, 하절기에 발전량이 증가

하는 것으로 나타났다. 이는 태양의 계절적 위치변화에 따른 일사수열량의 차이에 의해 발생된 경향으로 수평 설치조건인 태양광발전시스템의 경우 동일한 경향을 나타낸다. 전체 분석기간에 대한 평균 Y_f 는 2.46 h/d로 나타났으며, 최대 Y_f 는 초기인 2012년 7월에 4.26 h/d, 최소 Y_f 는 2016년 1월에 0.82 h/d를 나타내는 것으로 분석되었다. L_{BOS} 의 경우 평균, 최대, 최소가 각각 0.08 h/d, 0.19 h/d (2012년 7월), 0.01 h/d (2016년 1월)로 나타났으며, L_{BOS} 의 경우 손실요소 중 PCS의 DC-AC 변환에 따른 손실이 포함되기 때문에 Y_A 가 증가함에 따라 L_{BOS} 도 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig. 4 Results of analysis for monthly power performance of BAPV system installed on horizontal plane

본 연구에서는 L_C 를 3가지로 분류하여 분석을 수행하였다. 모듈의 온도 상승에 의한 손실($L_{c,thermal}$), 입사각 변화에 따른 손실($L_{c,IAM}$), 기타 손실($L_{c,miscellaneous}$)이다. $L_{c,thermal}$ 의 경우 외기온도와 일사수열량이 상대적으로 높은 하절기에 증가하는 것으로 나타났으며, 동절기에 감소하는 경향을 나타냈다. $L_{c,thermal}$ 의 전체 기간에 대한 평균, 최대는 각각 0.11 h/d, 0.49 h/d (2012년 7월)로 분석되었다. 분석 대상 시스템의 동절기 모듈 온도는 $-5^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 로 분석됨에 따라 표준시험조건의 기준온도인 25°C 보다 낮게 운영되었다. 따라서, 온도 상승에 의한 모듈의 효율감소로 손실된 발전량이 없는 것으로 분석되어 최소 $L_{c,thermal}$ 는 0.0 h/d로 분석되었다. $L_{c,IAM}$ 은 $L_{c,thermal}$ 와 달리 연중 일정 수준 이상의 손실이 고르게 분포되는 것으로 분석되었다. 이는 절기별로 일일 태양의 남중 고도각에 차이는 있지만, 하루 중 태양의 위치변화에 따른 입사각의 범위가 일일 남중고도각 $\sim 90^{\circ}$ (투과율 감소 영역 : 60° 이상)의 범위를 갖기 때문에 위의 결과가 나타난 것으로 판단된다. 전체기간에 대한 $L_{c,IAM}$ 는 평균 0.13 h/d, 최대 0.19 h/d (2015년 10월), 최소 0.05 h/d (2016년 8월)를 나타내는 것으로 분석되었다. $L_{c,miscellaneous}$ 는 L_C 중 $L_{c,thermal}$ 과 $L_{c,IAM}$ 에 의한 손실을 제외한 손실을 의미한다. $L_{c,miscellaneous}$ 에 의한 손실은 ‘모듈의 결함 및 파손’, ‘음영’, ‘먼지 및 낙엽 등에 의해 발생하는 표면 오염’, ‘적설’ 등 온도와 입사각을 제외한 요인에 의해 발생할 수 있다. 평균 0.83 h/d의 손실을 나타내는 것으로 분석되었으며, 최대 1.93 h/d (2017년 5월), 최소 0.25 h/d (2012년 11월)의 범위를 갖는 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 Fig. 4의 분석 결과를 토대로 Y_r 에 대한 각 지표의 비율과 분석 대상 기간 중 첫 번째 월인 2012년 7월의 PR을 기준으로 각 월의 PR의 감소비율(Degradation)을 나타낸 것이다. Fig. 5을 보면 2012년 7월 이후 계절적 특성에 따라 일부 PR이 증가한 기간도 존재하지만 지속적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 모니터링 초반 6개월 동안 평균 77.46%의 PR을 나타내는 것으로 분석되었으며, 후반 6개월 동안 평균 65.22%의 PR을 나타내는 것으로 분석되어 12.24%의 차이가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 5 Ratio of the performance and loss indicators to reference yield

각 손실 요소에 대한 비율 분석 결과 L_{BOS} 는 평균 2.02%, 최대 3.51%, 최소 0.60%로 분석되었으며, $L_{c,thermal}$ 은 평균 2.44%, 최대 8.92%로 분석되었다. $L_{c,IAM}$ 는 평균 4.03%, 최대 8.01% 최소 1.95%의 비율을 차지하는 것으로 분석되었다. 이는 전일사량을 활용하여 산출한 성능손실로 직달일사만 고려할 경우 약 2%대의 성능 손실이 발생될 것으로 예측된다. L_{BOS} , $L_{c,thermal}$, $L_{c,IAM}$ 이 경우 시간 경과에 따라 증가하는 경향을 나타내지 않았다. 반면 $L_{c,miscellaneous}$ 의 비율은 시간경과에 따라 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 모니터링 초반 6개월(2012년 7월부터 12월까지) 평균 12.17%로 분석된 반면, 2018년 7월부터 12월까지 25.84%로 분석됨에 따라 PR의 차이(12.24%)와 유사한 수준인 13.67%의 차이가 있는 것으로 분석되었다.

(2) 연간 발전성능

Fig. 6는 앞선 분석 결과를 활용하여 연간 발전성능 분석결과를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)를 보면 Y_r 이 유사한 2013년, 2015년, 2017년의 경우 L_{BOS} , $L_{c,thermal}$, $L_{c,IAM}$ 가 비교적 유사한 반면, $L_{c,miscellaneous}$ 경우 증가하는 것을 확인할 수 있다. 2013년, 2015년, 2017년에 $L_{c,miscellaneous}$ 가 각각 0.55 h/d, 0.90 h/d, 1.14 h/d로 분석됨에 2년을 주기로 약 0.25 ~ 0.35 h/d 씩 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 모니터링 자료에 대한 분석 결과로 2018년 이후 성능저하의 가중 여부는 성능 저하 요인의 명확한 규명 전에는 예측하는 것이 불가능하다.

Fig. 6 Results of the analysis to annual performance

이러한 $L_{c,miscellaneous}$ 의 증가로 인해 PR이 감소하는 것으로 나타났으며, 매해 PR 및 각 손실요소는 Table 2와 같이 분석되었다. PR의 경우 초기인 2012년의 경우 78.42%를 나타냈으며, 가장 마지막 해인 2018년의 경우 62.35%를 나타내 16.07%의 성능저하가 발생된 것으로 분석되었다. 1년 동안 모니터링 자료를 활용하여 분석된 2013년의 PR인 76.10%와 비교하더라도 13.75%의 성능저하가 나타난 것으로 분석되어 초기에 비해 10% 이상의 성능저하가 나타난 것으로 확인되었다.

Table 2 Performance ratio of each year

Year	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Average
Performance Ratio [%]	78.42	76.10	68.94	67.41	67.51	62.01	62.35	68.97
Capture Loss by Thermal [%]	4.84	3.80	2.72	3.45	1.57	2.99	2.69	3.14
Capture Loss by IAM [%]	3.56	3.30	3.50	3.45	3.71	3.48	3.60	3.51
Capture Loss by Miscellaneous [%]	10.43	14.18	22.73	23.44	25.50	29.36	29.49	22.16
BOS Loss [%]	2.75	2.62	2.11	2.25	1.82	2.10	1.88	2.22

3.2 전압 및 전류 특성 분석

$L_{c,miscellaneous}$ 는 온도 및 입사각 변화에 따른 영향을 제외한 성능저하 요인에 의해 증가한 것으로 판단된다. 온도 및 입사각을 제외한 성능저하 요인 중 내부 요인으로는 시스템을 구성하고 있는 하드웨어의 파손 및 결함 발생이 원인이 될 수 있으며, 외부 요인으로는 표면오염(먼지, 배설물, 낙엽 등), 적설, 음영 등에 의해 발생할 수 있다.

앞선 Fig. 5에서 $L_{c,miscellaneous}$ 의 증가 경향을 분석했을 때, 성능저하는 다양한 요인 중 시간이 경과함에 따라 가중되는 손실요인에 의한 것으로 판단된다. 물론 운영 기간 중 Fig. 5의 2012년 12월, 2018년 1월, 2월과 같이 동절기에 일부 적설에 의한 성능저하가 발생되지만 시간이 경과함에 따라 ‘적설’ 이전의 성능과 유사한 수준

으로 회복되기 때문에 장기적인 성능저하 요인으로 판단하기에는 한계가 있다.

따라서, 분석 대상 시스템의 성능저하 요인에 대한 세분화를 위해 모니터링 자료 중 직류 전압 및 직류 전류에 대한 상세분석을 수행하였다. 상세분석은 시간 경과에 따른 전압과 전류의 증감 분석을 통해 전압과 전류 중 어떠한 항목의 감소로 인해 발전량 감소가 유발되었는지 분석하기 위함이다. 전압 및 전류에 대한 분석을 위해 식(9)와 식(10)을 활용하여 일반화된 직류 전류(R_C)와 전압(R_V)를 산출하였다. 동일한 온도조건에서 일사강도의 차이에 따라 직류 전류의 값의 변화가 크기 때문에 식(9)와 같이 측정 시점의 일사량을 활용하여 측정 전류에 대한 보정을 하였다. 전압의 경우는 모듈의 온도에 따라 변화하지만 변화폭이 일사강도에 대한 전류의 변화폭에 비해 상대적으로 작기 때문에 측정 전압에 대한 보정 없이 일반화된 값을 산출하였다.

$$R_C = \{I_{dc,mea} / (H_i / G_{i,ref})\} / I_{mpp,array} \quad (9)$$

$$R_V = V_{dc,mea} - V_{mpp,array} \quad (10)$$

Fig. 7은 전체기간 중 매년 3~5월, 9~11월의 R_C , R_V 를 도식화한 것이다. 제외된 기간 중 동절기(1, 2, 12월)의 경우는 적설에 의한 영향을 배제하기 위해 분석에서 제외하였으며, 하절기(6~8월)의 경우는 강수에 의한 영향을 배제하기 위해 분석에서 제외하였다. 이 외에도 500 W/m^2 이상의 일사량 및 입사각 수정계수의 영향을 최소화하기 위해 11시부터 13시까지 측정된 자료만을 활용하여 분석하였다.

Fig. 7 Results of analysis for monthly power performance of BAPV system installed on horizontal plane

시간 경과에 따른 R_C , R_V 의 변화 경향을 보면 연중 변화는 존재하지만 R_V 의 경우 2012년과 2018년을 비교했을 때 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 반면에 R_C 의 경우 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향이 두드

러지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 해당 시스템의 성능저하를 가중시키는 성능손실 요인은 전류의 감소를 유발하는 요인으로 판단된다. 전류를 감소시키는 요인으로서는 모듈의 태양전지의 미세균열(Micro crack)^{14,15)}, 모듈의 구성 재료인 봉지재(Encapsulation)의 착색(Decoloration)^{16,17)} 및 박리(Delamination)^{14,16)}, 모듈의 커버 글라스의 파손¹⁴⁾, 모듈의 표면오염^{18,19)} 등이 해당된다. 모니터링 초기부터 성능저하가 발생되기 시작하였고, 시간이 경과함에 따라 가중된 경향을 종합 고려하면 분석 대상 시스템의 성능저하 가중을 발생시키는 요인은 표면오염에 의한 투과율 저하로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 건물부착형 태양광발전시스템을 대상으로 발전성능분석 및 성능저하 요인의 세분화를 위한 직류 전압 및 전류에 대한 성능 분석을 수행하였다. 총 6년 6개월의 모니터링 자료를 활용하여 분석을 수행하였으며, IEC 61724-1에서 제안하는 성능평가 방법을 활용하여 분석을 수행하였다. L_c 의 경우 '온도 상승으로 인한 손실', '입사각 변화에 따른 투과율 감소로 인한 손실', '기타 손실'로 분류하여 상세분석을 수행하였다.

- (1) 전체 분석 기간에 대한 Y_r , Y_A , Y_f 는 각각 3.60 h/d, 2.56 h/d, 2.48 h/d로 분석되었으며, L_{BOS} , $L_{c,thermal}$, $L_{c,IAM}$, $L_{c,miscellaneous}$ 는 각각 0.08 h/d, 0.12 h/d, 0.13 h/d, 0.80 h/d로 분석되었다. 이를 Y_r 에 대한 비율로 분석한 결과, 71.19%, 68.97%, 2.22%, 3.14%, 3.51%, 22.16%로 나타났다.
- (2) 전체 분석 기간에 대한 성능계수(PR)는 68.97%로 나타났으며, 분석 기간 중 초기에 해당하는 2012년의 경우 78.42%, 후기에 해당하는 2018년의 경우 62.34%로 분석되었다. PR은 시간이 경과함에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈으며 2012년과 2018년의 PR 차이는 16.07%로 분석되었다.
- (3) 성능 손실에 대한 상세분석 결과, L_{BOS} , $L_{c,thermal}$, $L_{c,IAM}$ 의 경우 일부 계절적 요인에 따라 증감은 발생하였지만, 시간이 경과함에 따라 증가가 없었던 반면 $L_{c,miscellaneous}$ 의 경우 시간이 경과함에 따라 지속적으로 증가하는 것으로 분석되었다. $L_{c,miscellaneous}$ 에 의한 손실은 2012년에 10.43%로 나타난 반면 2018년에 29.49%로 나타나 약 19.06%가 증가된 것으로 분석되었다.
- (4) R_C , R_V 의 시간 경과에 따른 변화추이를 분석한 결과 R_V 의 경우 시간경과에 따라 큰 차이가 없는 반면, R_C 의 경우 시간이 경과함에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 따라서, 시간경과에 따른 $L_{c,miscellaneous}$ 의 증가를 유발하는 주된 성능 손실 요인은 직류 전류의 감소를 유발하는 요인 중 하나인 모듈의 표면오염에 따른 투과율 감소로 판단된다.
- (5) 분석 대상 시스템의 경우 수평 설치 조건으로 표면오염에 대한 영향이 경사설치조건의 시스템에 비해 크게 나타날 수 있다. 경사설치조건의 시스템의 경우 어레이 표면에 적층된 먼지가 강수나 적설에 의한 세척 효과를 기대할 수 있지만, 분석 대상 시스템은 수평설치조건이기 때문에 세척효과가 미비할 수 있다. 따라서, 주기적인 세척 등 유지관리가 필요하다.

분석 대상 시스템의 경우 모니터링 초기부터 지속적인 성능저하가 가중되었다. 이는 해당 시스템의 사용자나 시설관리자 측면에서 유지관리가 이루어졌다면, 모니터링 초기의 성능을 유지하거나 이보다 나은 성능으로 시스템 운영이 가능했다는 것을 의미한다. 태양광발전시스템을 포함한 국내의 건물적용 신재생에너지 시스템의 경우 대부분 공공의무화 사업이나 제로에너지 건축물 인증 의무화 또는 에너지효율등급 인증제도 등과 같이 법적 기준 충족이나 정부의 신재생에너지 보급 정책으로 인해 설치된 시스템이 대부분이다. 이렇게 설치된 시스템은 사용자나 시설관리자 측면에서 에너지생산량 또는 시스템의 성능에 대한 관심 및 유지관리에 대한 노력이 부족하며, 유지관리에 대한 어려움을 나타내기도 한다¹⁰⁾. 따라서, 모니터링 시스템에서 고장진단이나 유지관리에 대한 정보를 사용자나 시설관리자에게 안내하는 등의 방법을 통해 설계 성능과 유사한 운영 성능을 발휘할 수 있도록 해야 신재생에너지 시스템의 역할을 다할 수 있을 것이며, 신재생에너지 시스템 보급을 위해 운영되었거나 운영하고 있는 제도들의 실질적 효과가 나타날 것이다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호: 20183010013840).

REFERENCES

1. The Portal of Climate Change Promotions, <https://www.gihoo.or.kr/portal/kr/change/government.do>, (access : 2021.08.18.)
2. Kim, Y. W. and Yu, K. H., Study on the Certification Policy of Zero-Energy Buildings in Korea, Sustainability, Vol. 12, pp. 5172, 2020.
3. Zero Energy Building, Zero Energy Building Policy Trends, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC03/BC03_05_002.do (access : 2021.08.18.)
4. Korea Energy Agency, <https://www.energy.or.kr/> (access : 2021.08.18.)
5. Korea Energy Agency, Zero Energy Building_Technology & Component Ver. 2, Korea Energy Agency, 2021.
6. Yang, S. M., Issue Analysis and Improvement Schemes in Executing New Renewable Energy Installation Institution for Public Buildings : Centered in University Facilities, Master's Thesis of Chungang University Graduate School, 2014.
7. Choi, J. H. and Kim, Y. S., The Technologies Selection of Applicable Renewable Energies for Construction field, Korea Institute of Construction Engineering and Management, Proceeding of KICEM Annual Conference, pp.529-530, 2012.
8. Kim, M. R., Lee, K. J., and Park, H. S., A Study on the Cases of New Renewable Energy Applied Buildings in Korea and Germany - Focused on Solar and Geothermal Energy Cases -, Journal of the Architectural Institute of Korea - Planning & Design, Vol. 28, No. 3, pp. 29-37, 2012.
9. Kim, H. S., Energy Saving Technology for High Rise Buildings Using Renewable Energy - Focused on BIPV Application Technology, The magazine of Korean Solar Energy Society, Vol. 10, No. 1, pp. 11-21, 2011.
10. Jang, H. I., Seong, Y. B., Cho, Y. H., Kim, Y. S., and Jo, J. H., An Analysis of Problems and the Current Status of Renewable Energy System in Buildings, Journal of the Korea Solar Energy Society, Vol. 32, No. 5, pp.

75-82, 2012.

11. International Electrotechnical Commission, IEC 61724-1:2017 Photovoltaic System Performance – Part 1 : Monitoring, International Electrotechnical Commission, 2017.
12. 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.
13. Souka, A. F. and Safwat, H. H., Determination of the Optimum Orientations for the Double-exposure, Flat-plate Collector and Its Reflectors, *Solar Energy*, Vol. 10, No. 4, pp. 170-174, 1966.
14. International Energy Agency, IEA-PVPS Task 13 Report – Review of Failures of Photovoltaic Modules, International Energy Agency, 2014.
15. Lee, K. Y., Lee, H. M., Lee, R. D., Kim, D. S., and Yoon, J. H., The Impact of Cracks in BIPV Modules on Power Outputs: A Case Study Based on Measured and Simulated Data, *Energies*, Vol. 14, 836, 2021.
16. Tsanakas, J. A. and Ha, L., Claudia Buerhop, Faults and Infrared Thermo-graphic Diagnosis in Operating c-Si Photovoltaic Modules: A Review of Research and Future Challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62, pp. 695-709, 2016.
17. Jeong, J. S. and Park, N. C., Field Discoloration Analysis and UV/temperature Accelerated Degradation Test of EVA for PV, 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2014.
18. Mohammad, R. M., Hashim, H., Chandima, G., Mohd, A. R., Mohammad, I. R., and Shahrooz, H., Power loss due to Soiling on Solar Panel: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 1307-1316, 2016.
19. Lorenzo, E., Moreton, R., and Luque, I., Dust Effects on PV Array Performance: In-field Observations with Non-uniform Patterns, *Progress in Photovoltaics*, Vol. 22, pp. 666-670, 2014.