

기상청 개방형-API 기상정보 기반 중소규모 태양광발전 성능평가 및 고장감지 원격 모니터링시스템

임희원¹ · 김일권² · 신우철^{3*}

¹대전대학교 대학원 건축공학과, 박사과정수료

²대전대학교 대학원 건축공학과, 석사과정

³대전대학교 건축공학과, 교수

KMA Open-API Weather Information based Performance Evaluation and Fault Detection Remote Monitoring System for Small and Medium-Scale PV Systems

Lim Hee Won¹ · Kim Il Kwon² · Shin U Cheul^{3*}

¹Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering Graduate School, Daejeon University

²MS. Course, Department of Architectural Engineering Graduate School, Daejeon University

³Professor, Department of Architectural Engineering, Daejeon University

*Corresponding author: shinuc@dju.ac.kr

Abstract

Small and medium-sized unmanaged grid-connected photovoltaic (PV) systems are difficult to manage owing to the installation costs of monitoring systems. Consequently, they can be left unattended for a long time following break downs. Thus, in this study, we developed a low-cost remote monitoring system for small-sized PV systems. The proposed monitoring system is equipped with a failure detection algorithm based on the simulation of an active system that accurately predicts the power output under normal operating conditions. Additionally, the monitoring system can recognize and notify a failure when the actual power generation is abnormally low. To lower the cost, we utilized SBC as a data server by edge computing and designed a monitoring system using the open-source software openHAB. Moreover, we used an open-API (ground weather observation data) provided by the Korea meteorological administration (KMA) to obtain hourly weather data (horizontal radiation, outdoor temperature, wind speed, etc.) for free to use in the simulation analysis. The Shewhart control chart was used as a benchmark for fault detection, where the ratio of the measured power generation to simulated generation was set as the observed value. From the verification test for actual grid-connected PV systems, it was confirmed that the monitoring system can effectively identify the occurrence of abnormal operating conditions, such as open-circuit, partial shading, etc.

Keywords: 개방형 인터페이스(Open-API), 고장감지(Fault detection), 슈하르트 관리도 (Shewhart control chart), 원격모니터링시스템(Remote monitoring system), 태양광발전시스템(PV system)

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.43, No.2, pp.65-78, April 2023
<https://doi.org/10.7836/kjes.2023.43.2.065>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 9 March 2023

Revised: 4 April 2023

Accepted: 5 April 2023

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

태양광발전시스템의 보급이 급속히 증가함에 따라 해당 설비의 관리 및 유지보수를 위한 모니터링시스템 또한 보편화되고 있다. 대규모 발전사업장의 경우 실시간 발전현황 및 고장 여부의 점검에 한정된 단순 방식에서 스트링이나 모듈별 고장감지 및 진단이 가능한 원격 모니터링시스템까지 구현되고 있다.

그러나 무인 운영되는 중·소규모 계통연계형 PV 시스템의 경우 상대적으로 고가의 모니터링시스템 구축이 제한적으로 이루어지며, 이로 인해 고장발생 시 시스템 방치가 장기간 지속되어 경제적 손실을 초래하게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 중·소규모의 PV 시스템에서 적용 가능한 저비용의 고장감지 원격 모니터링시스템을 제안하였다. 시뮬레이션 기반 성능평가 및 고장감지 알고리즘을 탑재한 태양광발전 원격 모니터링시스템은 정상적인 작동 조건에서 전력 생산량을 정확하게 추정하며, 실제 발전량이 비정상적으로 낮아질 때 시스템 고장으로 인지하고 통보하게 된다. 이를 통해 운영자는 적시에 시정 조치를 취할 수 있으며 시스템의 장단기 성능 저하에 따른 전력 손실을 최소화하게 된다.

기존의 연구동향을 살펴보면 많은 연구에서 원격 모니터링 기반 실시간 고장검출 알고리즘은 오류(고장)를 식별하기 위해 측정된 PV 시스템 발전량과 예측 발전량 간의 비교를 기반으로 하고 있다. PV 시스템 전력을 생산을 위한 예측 모델과 관련하여 Chouder et al. (2010)¹⁾와 Silvestre et al. (2013)²⁾, Madeti (2022)³⁾은 출력 전류와 전압 사이의 관계가 비선형 음적 방정식(Nonlinear implicit equation) 형태로 주어지는 Five-parameter 등가회로모델(Equivalent electrical-circuit model)을 기반으로 측정된 온도와 일사량 조건에서 정상운전상태의 PV 어레이의 최대 전력 좌표인 전류, 전압, 전력을 예측하였다. 또한 Firth et al. (2010)⁴⁾과 Kim et al. (2013)⁵⁾은 PV 모듈에서 수집된 온도와 일사강도, 발전량 데이터를 이용하여 단순 경험적 모델(Simple empirical models)과 확률적 선형회귀 모델(Probabilistic linear regression models)을 개발하고 발전효율을 각각 추정하였으며, Chao et al. (2008)⁶⁾과 Jenitha et al. (2017)⁷⁾은 상용 시뮬레이션 패키지를 사용하여 PV 시스템의 발전량을 예측하였다. 한편 Platon et al. (2015)⁸⁾과 Lim et al. (2022)⁹⁾은 PV 모듈의 발전 효율과 작동 온도의 선형적 관계에 기반한 상관 관계식(단일-방정식 모델)¹⁰⁾을 통해 발전량을 추정하였다. 이와같은 다양한 해석모델에서 PV 시스템 발전량을 정확하게 해석하려면 실제 현장에서 측정되는 기상자료를 필요로 한다. 따라서 데이터 처리를 위한 서버 컴퓨터와 프로그램 개발을 위한 상용 소프트웨어 외에 기상측정 센서 등으로 시스템 비용이 급속히 증가하게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 엣지 컴퓨팅방식의 단일보드 컴퓨터를 데이터서버로 오픈소스 플랫폼을 이용하여 어플리케이션을 설계하고, 시뮬레이션 해석에 요구되는 시간별 기상자료는 open-API를 통해 확보함으로써 저비용의 원격 모니터링시스템을 구현하고자 한다.

2. PV 시스템 고장감지

본 연구에서 시뮬레이션 해석은 일사강도와 PV 모듈온도를 사용하여 AC 발전량을 예측하는 단일-방정식 모델을 사용하였다.

2.1 PV 발전해석

최대 전력점 추종(Maximum power point tracking) 출력에서 태양광모듈의 발전효율, η_c 은 PV 모듈온도, T_c 의 선형적 함수형태로 식(1)과 같이 단일-방정식으로 나타낼 수 있다¹¹⁾.

$$\eta_c = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_r) + \gamma \log_{10} I_t] \quad (1)$$

여기에서 η_{ref} 는 표준시험조건(Standard test condition, 이하 STC)에서 모듈의 정격효율, β_{ref} 은 온도계수(Temperature coefficient), T_c 는 PV 모듈온도, T_r 는 기준온도 25°C, γ 는 일사계수(Solar radiation coefficient)를 각각 나타낸다. 결정계 실리콘 모듈의 경우 일사계수는 0으로 근사된다.

PV 모듈온도는 일사강도 및 외기온의 함수로 식(2)와 같이 계산할 수 있다.

$$(\tau\alpha)I_t = \eta_c I_t + U_L(T_c - T_a) \quad (2)$$

여기서 $(\tau\alpha)$ 는 태양광모듈의 일사·흡수율, T_a 는 외기온, U_L 은 열손실계수를 나타낸다.

식(1)을 식(2)에 대입하면 PV 모듈온도, T_c 는 식(3)과 유도된다.

$$T_c = \frac{U_L T_a + ((\tau\alpha) - \eta_{ref} - \eta_{ref}\beta_{ref} T_r) I_t}{U_L - \eta_{ref}\beta_{ref} I_t} \quad (3)$$

전면과 후면이 외기에 노출된 PV 모듈의 경우 열손실계수, U_L 은 다음과 같이 주어진다¹²⁾.

$$U_L = 2 \times (5.67 + 3.86 V_{wind}) \quad (4)$$

여기서 V_{wind} 는 풍속을 나타낸다.

수평면 총 일사량으로부터 입사각 손실을 고려한 PV 모듈 경사면 총일사, I_t 를 식(5)와 같이 추정할 수 있다. 본 연구에서는 수평면에 대한 직달과 산란성분을 분리하기 위해 Erbs et al. (1982)¹³⁾의 제안식을 적용하였으며, 경사면에 대한 천공산란 일사는 Reindl et al. (1990)¹⁴⁾의 비등방성 천공모델(Anisotropic sky model)을 통해 계산하였다.

$$I_t = R_b I_b K_b + I_d K_d \frac{1 + \cos\beta}{2} + (I_b + I_d) \rho_g K_g \frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (5)$$

여기서, R_b 는 수평면에 대한 경사면 직달일사비, I_b 은 수평면 직달일사, I_d 은 경사면 천공산란일사, K_b , K_d , K_g 는 직달 및 천공산란, 지면반사 일사성분에 대한 입사각수정인자, ρ_g 는 지면반사율, β 는 PV 모듈 경사각을 나타낸다.

일사의 성분별 입사각수정인자, K_i 는 식(6)과 같다.

$$K_i = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta_i} - 1 \right) \quad (6)$$

여기서, b_0 는 입사각수정계수, θ_i 는 일사의 성분별 PV 모듈의 입사각을 나타낸다.

경사면에 대한 직달일사의 입사각, θ_b 은 식(7)과 같이 계산된다.

$$\theta_b = \cos^{-1}(\cos(\phi - \beta) \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta) \quad (7)$$

Brandemuehl et al. (1980)¹⁵⁾은 천공산란 및 지면반사 일사에 대한 유효 입사각(Effective incidence angle), θ_d 와 θ_g 을 다음과 같이 제안하였다.

$$\theta_d = 59.68 - 0.1388 \beta + 0.001497 \beta^2 \quad (8)$$

$$\theta_g = 59 - 0.5788 \beta + 0.002693 \beta^2 \quad (9)$$

여기서, ϕ 는 위도, ω 는 시간각, δ 는 일적위를 나타낸다.

따라서 입사각 및 온도손실이 고려된 PV 시스템의 AC 출력(발전량), P_{pred} 은 식(10)과 같이 계산된다.

$$P_{pred} = \eta_s \eta_c I_t A_{PV} \quad (10)$$

여기서, η_s 은 시스템 손실이 반영된 작동효율, A_{PV} 는 모듈의 총 설치면적을 나타낸다.

PV 시스템 손실은 인버터 손실 외에 옴손실(Ohmic losses), 모듈 품질손실(Module quality loss), 어레이 부정합 손실(Array mismatch loss), 모듈 오염손실(Module soiling loss) 등 다른 메커니즘에 의한 모든 손실이 포함된다¹⁶⁾.

2.2 기상청의 개방형-API

일반적으로 웹 서비스(Web Services) 형태로 특정 기능 혹은 콘텐츠 서비스를 위해 외부에 접근 방법을 공개한 형태를 개방형(open)-API (Application programming interface)라 한다. 개방형-API의 동작 단계는 사용자 입장에서 요청(Request)하는 단계와 결과(Response)값을 받아 해석(Parse)하는 단계로 구성된다. 이용자는 해당 개방형-API 주소 뒤에 매개변수 값을 붙이는 GET 방식 또는 페이지 폼 안의 변수에 대한 POST 전달방식을 통하여 API 매개변수 값을 전달하고, 서버에서 처리 수행한 결과를 반환받는다. 현재 국내 기상청의 개방형-API 기상정보(기상청 지상 시간자료 조회서비스)는 공공데이터포털¹⁷⁾을 통해 무료로 제공되고 있으며, 현지 점으로부터 11시간 이전 시간별 수평면 일사량과 및 외기온, 풍속 등을 조회할 수 있다.

2.3 데이터 검증

시뮬레이션 해석모델은 정상운전 조건에서 예상 출력을 나타내므로, 데이터 분석을 통해 PV 시스템의 비정상적인 측정값을 식별하고 제거해야 한다. Fig. 1은 3 kW급 PV 시스템(4장 참조)에서 18일 동안 1분 간격 일사량도에 따른 실측 발전량을 나타낸 것이다. 선형회귀분석에 결정계수(R^2)는 0.9882로 정상운전에서 PV 발전량은 일사량도(Irradiance)와 강한 선형적 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 일사량도와 PV 발전량의 선형회귀선에서 가까운 측정치는 정상운전 데이터로 분류되는 반면, 주어진 일사량도 수준에서 과소 또는 과다한 발전량을 기록할 때 비정상적인 전력생산에 해당한다. 이와 같은 비정상 운전데이터는 계측기나 장비 일시적 오작동 등과 더불어 데이터 샘플링 시간 사이의 부적절한 동기화로 인해 야기될 수 있다⁸⁾. 또한 저일사 영역에서는 모듈의 개방전압 및 필 팩터의 감소로 인해 발전효율이 현저히 감소하는 측정치가 발생할 수 있다¹⁸⁾.

Fig. 2는 측정 변동성을 감소시키기 위해 Fig. 1의 1분 간격 일사량도에 따른 모든 실측 발전량을 1시간 평균값으로 나타낸 것이다. 비정상 운전데이터가 대부분 제거된 상태에서 R^2 는 0.9989로, 두 결과 총 발전량의 상대 오차는 2.0%가 되었다.

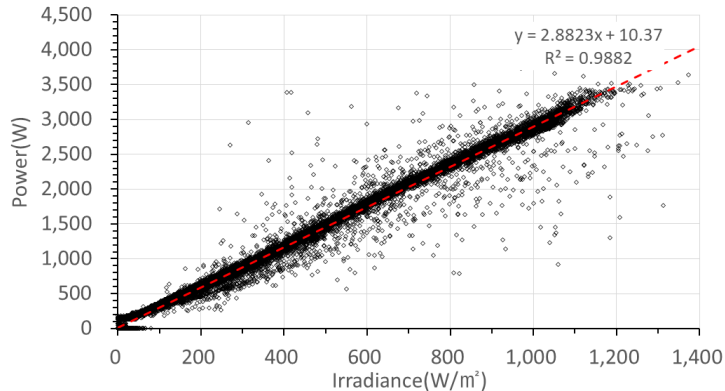


Fig. 1 Power and irradiance for one-minute measurements

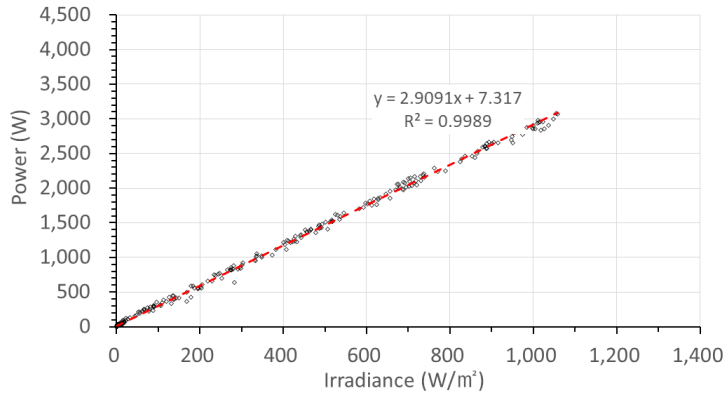


Fig. 2 Power and irradiance for the hourly average

2.4 고장감지 알고리즘

본 연구에서는 PV 시스템의 고장감지를 위한 벤치마크(Benchmark)로 슈하르트 관리도(Shewhart control chart)를 사용하였다. 슈하르트 관리도는 통계적 공정관리(Statistical process control) 기법의 일종으로 기준선(Center line, 이하 CL)과 제어상한(Upper control limit, 이하 UCL), 제어하한(Lower control limit, 이하 LCL) 등 3개의 참조선을 갖는 시계열 그래프이다^{19,20}. UCL 과 LCL 은 식(11)과 식(12)와 같이 각각 설정되고 관측값이 제어한계선을 벗어날 때 이를 고장으로 감지하게 된다²¹.

$$UCL = CL + 2\sigma \tag{11}$$

$$LCL = CL - 2\sigma \tag{12}$$

여기서, CL 은 관측값의 평균, σ 는 관측값의 표준편차를 나타낸다.

3. 원격 모니터링시스템 설계

3.1 원격 모니터링시스템 설계 플랫폼

본 연구에서는 오픈소스 플랫폼(Open source platform)으로 장치 및 센서 노드(Node)를 통합하고 데이터베이스(DB: database)에 연계가 가능한 openHAB (Open Home Automation Bus)²²을 사용하여 PV 고장감지 원격 모니터링시스템을 개발하였다. openHAB은 Equinox (Eclipse PDE) OSGi (Open Service Gateway initiative) 프레임워크 상에서 자바로 구현되어 있으며, KNX, Z-Wave, Insteon, Arduino, Ethernet, MQTT 등 다양한 사물인터넷 기기와 프로토콜 및 Linux, macOS, Windows, Raspberry Pi, Docker, Synology 등 운영체제의 제약 없이 동적으로 통합할 수 있도록 설계되었다. 또한, openHAB은 바인딩(Binding)을 통해 오픈소스

데이터 시각화 도구(Grafana, Kibana, Chronograf 등)나 시계열 데이터베이스(InfluxDB, mariaDB, RRD4J, PostgreSQL 등)와 통합할 수 있으며 웹(Web)이나 iOS, Android 등을 통해 어디서나 접속이 가능하다.

3.2 데이터 서버

원격 모니터링시스템의 데이터 서버구축은 클라우드 컴퓨팅(Cloud computing)과 엣지 컴퓨팅(Edge computing)으로 구분할 수 있다. 클라우드 컴퓨팅을 적용한 서버의 경우 처리해야 할 데이터가 많을수록 시스템의 부하가 증가하는 반면 엣지 컴퓨팅은 디바이스와 네트워크 사이의 거리가 상대적으로 가까워서 서비스의 수행 속도가 빠르고 통신부하를 감소시킬 수 있다. 또한 엣지방식은 외부 네트워크망의 문제로 통신이 단절되었을 때 엣지서버(Edge server)에 저장된 원본 데이터의 유실을 막아 시스템 전체의 피해를 최소화할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 엣지방식으로 ARM (Advanced RISC Machine) 기반 단일보드 컴퓨터(SBC: single board computer)인 Odroid N2를 이용하여 데이터 서버를 구축하였다. Odroid N2는 마이크로프로세서와 메모리, 입출력 등이 단일회로기판에 통합된 저전력 초소형 컴퓨터로 저비용 시스템 구축이 가능하다.

4. 고장감지 태양광발전 원격 모니터링시스템 실증

4.1 태양광발전시스템

Fig. 3은 원격 모니터링시스템의 실증을 위해 대전지역 건물 옥상에 설치된 3 kW 계통연계 태양광발전시스템을 나타낸 것이다. 남서향(방위각 10°) 45°의 경사각으로 8개의 380 W PV 모듈이 직렬로 연결되었으며, 인버터는 D사의 3.5 kW급 모델(ESP3K5-KRA/B)로 그 하단에서 E사의 전력량계(GEMS-3512)를 설치하였다.

한편 기상청 개방형-API에서 제공하는 기상자료를 검증하기 위해 PV 시스템 주변에 수평면 일사계와 외기 온 측정을 위한 RTD 온도센서를 백엽상 내부에 각각 설치하였다. Fig. 4는 현장에 설치된 모니터링 장치를 나타낸 것이다.



Fig. 3 Photovoltaic system

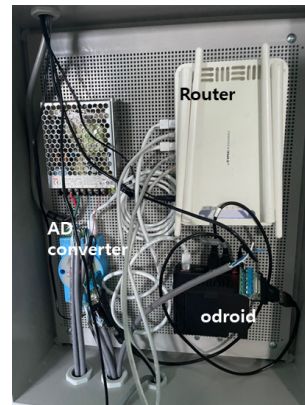


Fig. 4 Monitoring devices

4.2 모니터링시스템 구축

Fig. 5는 실증 현장에 구축된 원격 모니터링시스템 계통도를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 본 연구에서는 엣지 컴퓨팅방식으로 데이터 서버는 ARM 프로세서가 탑재된 Odroid N2을 사용하였다. 일사계 데이터는 RS-485 통신으로, 전력량계의 AC 발전량과 아담(Adam)-6015에 의해 디지털신호로 변화되는 RTD 온도센서 데이터는 라우터를 통해 TCP/IP 통신으로 Odroid N2에 각각 전송된다. Odroid N2에 탑재된 openHAB에는 오픈소스 시계열 데이터베이스인 InfluxDB와 DB들과 연계를 지원하며 주로 시계열 데이터 시각화에 많이 사용되는 Grafana를 각각 바인딩(Binding)하였다. openHAB은 종단노드(End node) 측 센싱 및 오픈-API 데이터(Sensing data)를 ‘Thing’의 통신 요청 패키지 정의를 통해 호출한다. 호출된 데이터들은 ‘Item’으로 연계되며 모니터링 화면에서 실제 사용자가 확인 가능한 데이터나 그래프로 표시되며, 이때 시뮬레이션 발전해석 및 고장감지 알고리즘은 ‘Rule’ 엔진을 통해 구현된다.

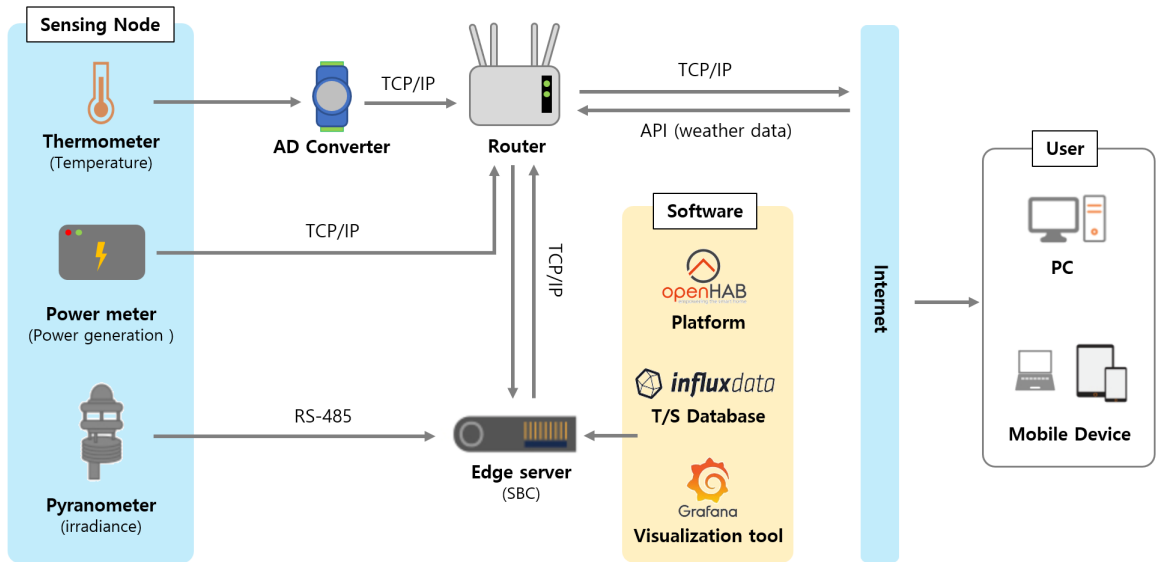


Fig. 5 Photovoltaic system schematic diagram of PV remote-monitoring system

4.3 기상청의 개방형-API 기상자료 검증

Fig. 6은 현장에서 측정된 1시간 평균 수평면 일사강도 및 외기온을 기상청의 개방형-API와 비교한 것이다. 여기서 대전 기상청과 실증 사이트 간의 직선거리는 14 km로 나타났다. 6일 동안 두 결과의 일별 총 일사량의 상대오차는 $\pm 1.5\%$ 이하로 거의 동일하며, 시간별 일사강도 및 외기온 분포 또한 일치되는 것을 알 수 있다.

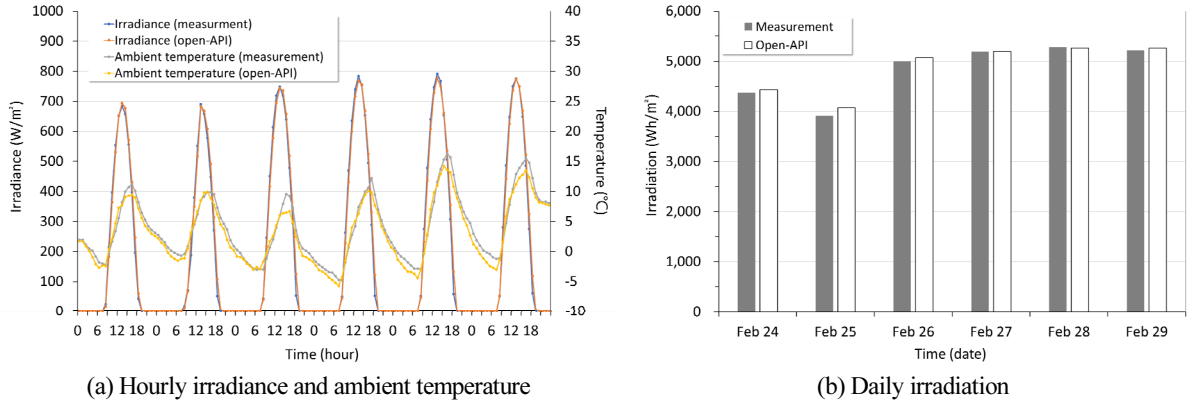


Fig. 6 Weather data between measurement and open-API

4.4 시뮬레이션 모델의 타당성 검토

본 연구에서는 검증데이터로 30일간 실측된 1시간 평균 발전량과 시뮬레이션 결과를 확보하고, 선형회귀분석과 식(13)의 평균제곱근오차(Root mean square error, 이하 RMSE)을 통해 시뮬레이션 모델의 타당성을 분석하였다. Fig. 7은 기상청의 개방형-API 데이터를 사용한 시뮬레이션 예측 결과를 실측 발전량과 비교한 것이다. 여기서 모듈의 개방전압 및 필 팩터의 감소로 인해 발전효율이 현저히 저하되는 저일사 영역(일사강도 150 W/m² 이하)은 제외하였다. 두 결과 사이의 선형회귀분석에 따른 R²와 RMSE는 각각 0.9853과 116 W로, 시뮬레이션 모델의 신뢰성을 확인할 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{pred,i} - P_{meas,i})^2}{n}} \tag{13}$$

여기서, n 은 검증데이터의 개수를 나타낸다.

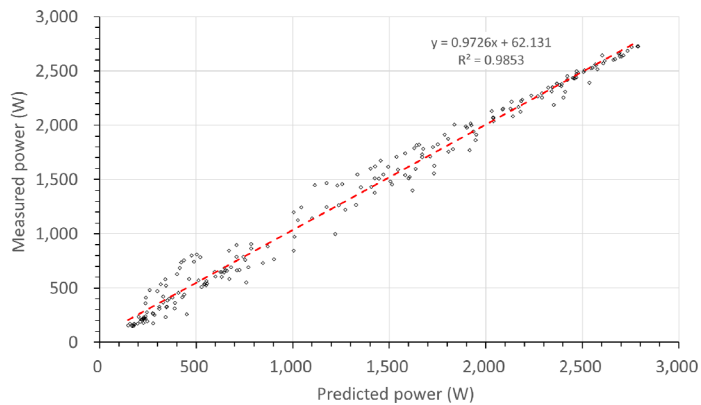


Fig. 7 Comparison between predicted and measured generation

4.5 제어한계

본 연구에서는 식(14)와 같이 시뮬레이션 예측 발전량(P_{pred})에 대한 실측 발전량(P_{meas})의 비, RP 을 슈하르트 관리도의 관측값으로 설정하였다.

$$RP = \frac{P_{meas}}{P_{pred}} \tag{14}$$

Table 1은 검증데이터를 통해 도출된 RP 의 평균값(CL)과 표준편차를 나타낸 것이다. 따라서 슈하르트 관리도에 따른 실증 PV 시스템 정상운전의 한계를 식(15)와 같이 설정할 수 있다. 제어한계선이 $CL \pm 2\sigma$ 이 될 때 정상운전 관측치(RP)의 95.4%가 이 범위 내에 있게 된다.

Table 1 Control limits for Shewhart chart

Mean, CL	Standard deviation, σ	2σ
1.049	0.192	0.384

$$0.665 \leq RP \leq 1.433 \tag{15}$$

5. 고장감지 태양광발전 원격 모니터링시스템 구현

Fig. 8은 실증 PV 시스템에 구축된 원격 모니터링시스템의 화면을 나타낸 것이다. 상부에는 실측된 실시간 발전현황 및 기상정보가 표시되고, 그 하부에는 매일 오전 10시 기준으로 분석된 전일의 시간별 발전량과 슈하르트 관리도가 제공된다.

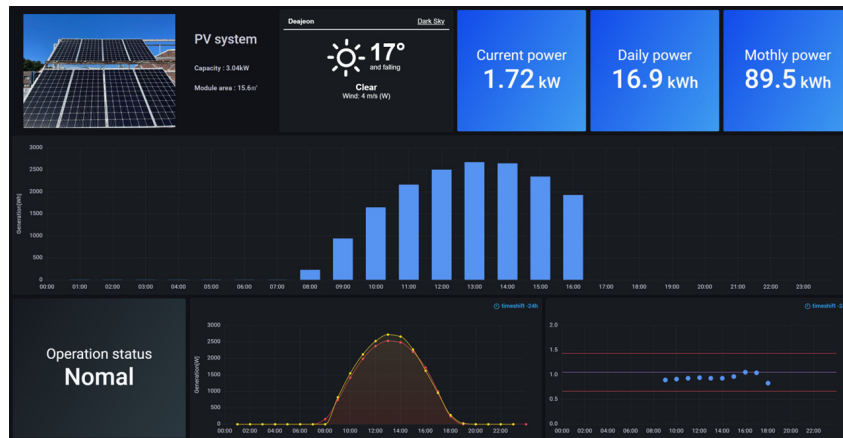


Fig. 8 Web screen of PV remote monitoring system

Fig. 9는 맑은 날의 일일 시간별 실측 및 시뮬레이션 발전량과 이에 따른 슈하르트 관리도를 나타낸 것이다. 실측과 시뮬레이션 예측 발전량에 따른 RMSE와 일 총발전량의 상대오차는 각각 144 W와 5.9%로 거의 일치하고 있으며, 슈하르트 관리도는 정상운전 상태를 정확하게 보이고 있다.

Fig. 10은 흐린 날의 발전량과 이에 따른 슈하르트 관리도를 나타낸 것이다. 기상조건에 변화에도 시뮬레이션 예측 발전량은 실측량을 정확하게 추종하며, RP 가 슈하르트 관리도의 제어한계선 내에서 정상적으로 작동하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 오후 3시부터 단선(open circuit)을 유도한 경우, 이에 따른 발전량과 슈하르트 관리도를 나타낸 것이다. 정상운전을 유지하는 슈하르트 관리도가 단선에 따른 이상발생을 정확하게 감지하는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 일시적인 부분 음영(Partial shading) 발생 시 발전량과 슈하르트 관리도를 나타낸 것이다. 여기서 음영은 직렬로 연결된 8개의 PV 모듈에서 3개의 모듈을 그늘막으로 오전 11시부터 오후 2시까지 덮은 상태에서 실행되었다. 슈하르트 관리도가 부분 음영에 따른 비 정상운전을 정확하게 감지하고, 그늘막이 제거될 때 다시 정상 회복되는 것을 알 수 있다. 즉 부분 음영이나 적설 등으로 인한 일시적인 PV 모듈 출력 저하를 고장으로 진단할 수 없으며, RP 의 제어한계선 이탈이 지속될 때 고장에 대한 경고를 제공하게 된다.

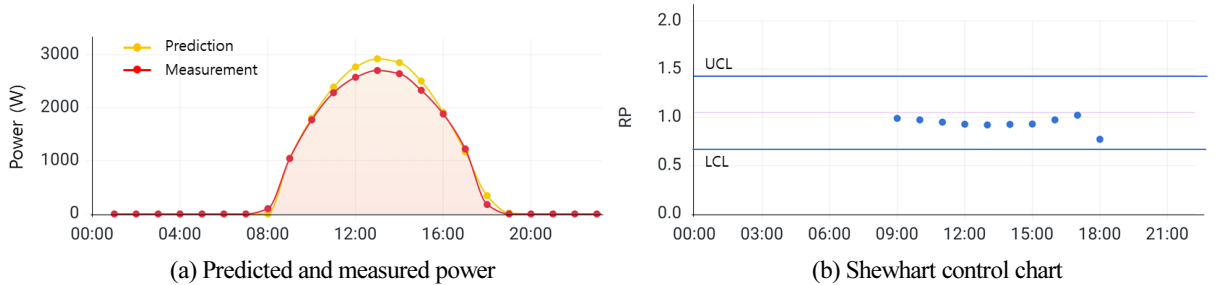


Fig. 9 Monitoring results on a clear day

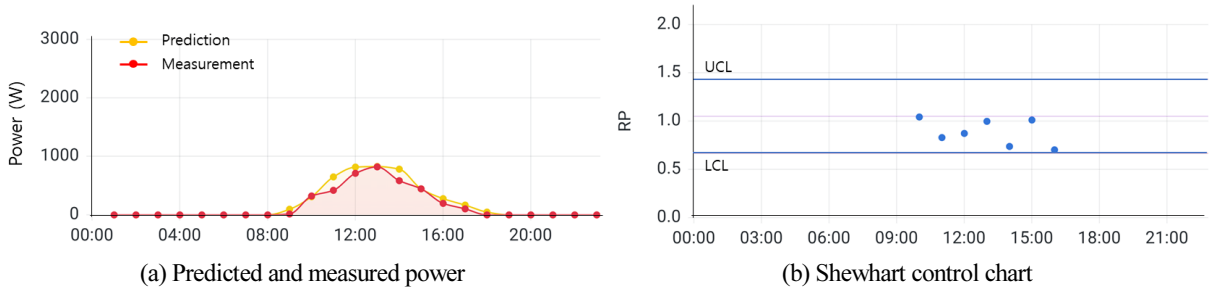


Fig. 10 Monitoring results on a cloudy day

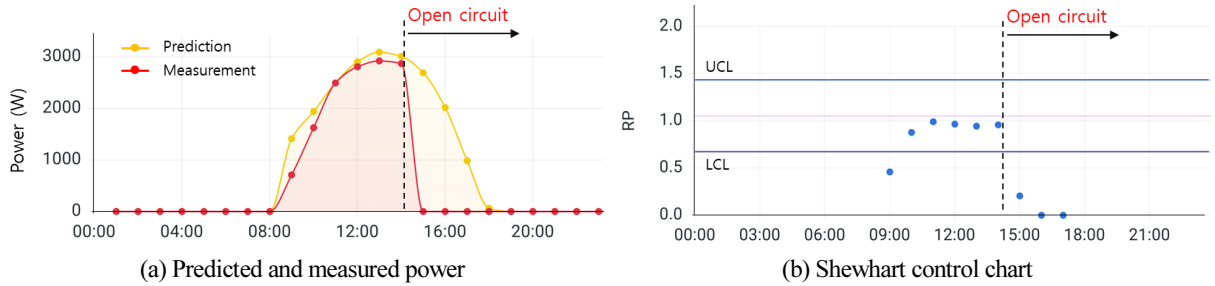


Fig. 11 Monitoring results in the presence of open-circuit faults.

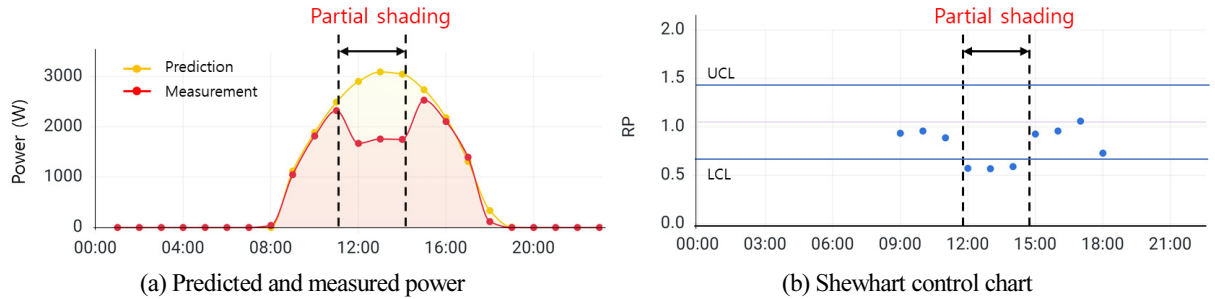


Fig. 12 Monitoring results in the presence of temporary shading

6. 결론

본 연구에서는 중·소규모 PV 시스템을 위한 저비용 원격 모니터링 시스템을 제안하였다. 시뮬레이션 기반 성능평가 및 고장감지 알고리즘을 탑재한 태양광발전 원격 모니터링 시스템은 정상적인 작동 조건에서 전력 생산량을 정확하게 추정하며, 실제 발전량이 비정상적으로 낮아질 때 시스템 고장으로 인지하고 통보하게 된다. 저비용 구현을 위해 엣지 컴퓨팅 방식으로 SBC를 데이터서버로 적용하고 오픈소스 소프트웨어인 openHAB을 이용하여 모니터링 시스템을 설계하였으며, 시뮬레이션 해석에 요구되는 시간별 기상자료는 open-API로 기상청에서 무료로 제공하는 지상 시간자료 조회서비스를 통해 확보하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 현장에서 측정된 1시간 평균 수평면 일사강도 및 외기온을 직선거리 14 km 떨어진 대전 기상청의 개방형 -API와 비교한 결과, 6일 동안 두 결과의 일별 총 일사량의 상대오차는 $\pm 1.5\%$ 이하로 거의 동일하며, 시간별 일사강도 및 외기온 분포 또한 일치되는 것으로 나타났다.
- (2) 30일 동안 실측된 1시간 평균 발전량과 시뮬레이션 예측 결과 사이의 선형회귀분석에 따른 결정계수와 평균제곱근오차는 각각 0.9853와 116 W로 각각 나타나 시뮬레이션 모델의 타당성을 확인하였다.
- (3) 고장감지 벤치마크는 정상작동 조건에서 실측 발전량에 대한 시뮬레이션 예측 발전량의 비를 관측치로 슈하르트 관리도를 사용하였다. 실제 계통연계 PV 시스템을 대상으로 한 시험 결과, 정상운전이나 단선, 부분 음영발생 등의 비정상 운전상태에서 시스템의 결함발생 여부를 정확하게 감지하는 것으로 나타났다. 본 고장감지 원격 모니터링 시스템은 시뮬레이션 기반으로 구조가 간단하며 저비용으로, PV 시스템의 설치

형태 및 용량이 파악된다면 어디 지역이나 쉽게 적용할 수 있는 확장성을 갖고 있다. 향후 기상청의 개방형-API를 통한 실시간 기상자료가 확보된다면 더욱 신속한 시스템 구축이 가능할 것으로 판단된다.

후기

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 농업에너지 자립형 산업모델 기술 개발사업(태양열을 활용한 에너지 생산 저장 관리 및 실증모델 구축)의 지원을 받아 연구되었음(과제번호 120093-3).

REFERENCES

1. Chouder, A. and Silvestre, S., Automatic Supervision and Fault Detection of PV Systems Based on Power Losses Analysis, *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 10, pp. 1929-1937, 2010.
2. Silvestre, S., Chouder, A., and Karatepe, E., Automatic Fault Detection in Grid Connected PV System, *Solar Energy*, Vol. 94, pp. 119-127, 2013.
3. Madeti, S. R. K., A Monitoring System for Online Fault Detection in Multiple Photovoltaic Arrays, *Renewable Energy Focus*, Vol. 41, pp. 160-178, 2022.
4. Firth, S. K., Lomas, K. J., and Rees, S. J., A Simple Model of PV System Performance and Its Use in Fault Detection, *Solar Energy*, Vol. 84, No. 4, pp. 624-635, 2010.
5. Kim, Y. and Shim, K., Efficiency Computation and Failure Detection of Solar Power Generation Panels, *Journal of KIISE : Computer Systems and Theory*, Vol. 40, No. 1, pp. 1-7, 2013.
6. Jenitha, P. and Selvakumar, A. I., Fault Detection in PV Systems, *Applied Solar Energy*, Vol. 53, pp. 229-237, 2017.
7. Chao, K. H., Ho, S. H., and Wang, M. H., Modeling and Fault Diagnosis of a Photovoltaic System, *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 1, pp. 97-105, 2008.
8. Platon, R., Martel, J., Woodruff, N., and Chau, T. Y., Online Fault Detection in PV Systems, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 6, No. 4, pp. 1200-1207, 2015.
9. Lim, H. W., Kim, I. K., Kim, J. H., and Shin, U. C., Simulation-based Fault Detection Remote Monitoring System for Small-scale Photovoltaic Systems, *Energies*, Vol. 15, No. 24, pp. 9422, 2022.
10. Skoplaki, E. and Palyvos, J. A., On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations, *Solar Energy*, Vol. 83, No. 5, pp. 614-624, 2009.
11. Evans, D. L., Simplified Method for Predicting Photovoltaic Array Output, *Solar Energy*, Vol. 27, No. 6, pp. 555-560, 1981.
12. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Sons, 2013.
13. Erbs, D., Klein, S., and Duffie, J. A., Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-average Global Radiation, *Solar Energy*, Vol. 28, No. 4, pp. 293-302, 1982.
14. Reindl, D. T., Beckman, W. A., and Duffie, J. A., Diffuse Fraction Correlations, *Solar Energy*, Vol. 45, No. 1, pp. 1-7, 1990.
15. Brandemuehl, M. J. and Beckman, W. A., Transmission of Diffuse Radiation through CPC and Flat-plate Collector Glazings, *Solar Energy*, Vol. 24, No. 5, pp. 511-513, 1980.

16. Mermoud, A., Modeling Systems Losses in PVsyst, Institute of the Environmental Sciences Group of Energy – PVsyst, Université de Genève, 2010.
17. Official Korean Government Portal, 2023. <https://www.data.go.kr>. last accessed on the 18th April 2023.
18. Pervaiz, S. and Khan, H. A., Low Irradiance Loss Quantification in c-si Panels for Photovoltaic Systems, Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 7, No. 1, pp. 013129, 2015.
19. Nist/Sematech e-Handbook of Statistical Methods, 2012. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>. last accessed on the 18th April 2023.
20. Montgomery, D. C., Introduction to Statistical Quality Control, John Wiley & Sons, New York, 2005.
21. Filho, E. A. S., Müller, B., Holland, N., Reise, C., Kiefer, K., Kollosch, B., and Branco, P. J. C., Practical Recommendations for the Design of Automatic Fault Detection Algorithms Based on Experiments with Field Monitoring Data, Solar Energy, Vol. 244, pp. 227-241, 2022.
22. openHAB Documentation, 2023. <https://www.openhab.org/docs>. last accessed on the 18th April 2023.