

WiFi 통신 기반 태양광 발전 스트링 무선 모니터링용 PV-WiFi 모듈의 구현

정진두*, 이일우*

Implementation of a PV-WiFi Module for Wireless String Monitoring of Photovoltaic Based on WiFi Communication

Jin-Doo Jeong*, Il-Woo Lee*

요약

본 논문은 WiFi 통신에 기반한 태양광 발전 스트링 무선 모니터링을 위한 PV-WiFi 모듈의 구현 방법에 대해 기술한다. 본 논문에서 제시하는 스트링 모니터링 방식은 클램프형 전류 센서를 사용하여 태양광 발전소 접속반 내 장치나 전선의 분해, 수정, 재조립을 필요로 하지 않고 편리하게 접속반 내에 부착할 수 있어 기존 레거시 접속반에도 쉽게 적용 가능한 높은 적용 편리성을 가진다. PV-WiFi 모듈은 크게 ATmega328 MCU 처리부와 ESP8266 WiFi 처리부로 구성된다. ATmega328 MCU 처리부는 아날로그 센싱 신호를 입력받아 스트링에서의 실제 전류값을 잡음을 억제하면서 계산한 후 UART 통신을 통해 ESP8266 WiFi 처리부로 전송한다. ESP8266 WiFi 처리부는 PV 스트링 데이터 수집 모듈과 WiFi 통신하여 데이터 요청 패킷을 수신하여 ATmega328 MCU 처리부로 전달하거나, ATmega328 처리부로부터 전달받은 스트링 데이터를 PV 스트링 데이터 수집 모듈로 전송한다. 본 논문에서는 실제 운용되는 태양광 발전소 접속반에 적용된 PV-WiFi 모듈에 기반한 PV 스트링 무선 모니터링 테스트 결과도 제시한다.

Key Words : Photovoltaic (PV), Combiner Box, String, Monitoring, WiFi.

ABSTRACT

This paper describes implementation method of a PV-WiFi module for wireless photovoltaic (PV) string monitoring based on WiFi communication. The string monitoring method presented in this paper can be conveniently applied to the combiner box without the need for disassembly, modification, and reassembly of devices or wires in the combiner box by using clamp-type current sensor. The PV-WiFi module is composed of the ATmega328 MCU processing part and the ESP8266 WiFi processing part. The ATmega328 MCU processing part calculates the actual current values in the strings with the analog signals from the clamp-type current sensor while suppressing noises and transmits the calculated values to the ESP8266 WiFi processing part via UART communication. The ESP8266 WiFi processing part communicates with the PV string data collection module through WiFi to receive a data request packet and transfer it to the ATmega328 MCU

※ 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20173010013610)

♦ First Author : Energy & Environment ICT Research Department, ETRI, jdjeong@etri.re.kr, 정희원

◦ Corresponding Author : Energy & Environment ICT Research Department, ETRI, jdjeong@etri.re.kr, 정희원

* Energy & Environment ICT Research Department, ETRI, ilwoo@etri.re.kr, 정희원

논문번호 : 202006-128-D-RN, Received June 15, 2020; Revised August 26, 2020; Accepted September 9, 2020

processing part. And, the ESP8266 part transmits the string generation data transferred from the ATmega328 processing part to the PV string data collection module. In this paper, the results of the PV string wireless monitoring test based on the PV-WiFi module applied to the actual PV combiner box are also presented.

I. 서 론

2017년 12월, 대한민국 정부에서는 전력계통 안정성, 국내기업의 보급여건, 잠재량 등을 고려하여 2030년까지 재생에너지 발전량 비중 20%를 목표로 하고, 누적 재생에너지 설비용량을 63.8GW까지 보급한다는 것을 골자로 하는 재생에너지 3020 이행계획을 발표하였다^[1]. 또한, 최근 기후변화 문제 대책에 적극적인 스페인에서는 2050년까지 전력 시스템을 궁극적으로 완전히 재생 가능 에너지 자원으로 전환하여 온전히 탈탄소화하려는 계획을 발표하였고, 이에 따라 10년 안에 매년 최소 3천 MW의 태양광 및 풍력 발전 용량을 설치하기로 약속했다^[2]. 지금 세계는 지구 온난화에 기인한 기후 변화 문제에 대한 대응책으로 태양광 발전(Photovoltaic, PV)을 포함한 재생 에너지 발전 자원들을 주목하고 있다.

태양광 발전소에서 생산되는 전력의 발전 효율을 지속적으로 최대 상태로 유지하기 위해서는 태양광 발전소에 대한 효율적인 고장 진단을 통한 유지/보수가 핵심이라 할 수 있는데, 효율적인 고장 진단을 수행하는데 있어 태양광 발전소의 발전 정보를 구체적으로 모니터링하는 방법이 기반이 된다^[3]. 하지만, 태양광 발전소 소유주 또는 사업주가 태양광 발전량을 모니터링하는 일반적인 방법인 PV 인버터단 혹은 그 상위 레벨에서의 지역 모니터링 (Zone Monitoring) 방법으로는 태양광 발전소 세부 구성 요소들의 발전/상태 정보를 구체적으로 모니터링하기에는 한계가 있다. 인버터 레벨에서의 지역 모니터링 방법보다 설치 비용이 다소 상승하지만, 인버터 레벨 아래에서 태양광 발전소를 구성하는 스트링을 모니터링하는 스트링 모니터링 (String Monitoring) 방법을 통해 보다 상세하고 정확한 태양광 발전소의 모니터링이 가능하다^[4]. 이러한 스트링 모니터링에 기반한 태양광 발전소의 성능 진단 또는 고장 여부 판단에 활용되는 방법을 ACMTs (Adjacent String Comparison Measurement Techniques)라고 할 수 있다^[5]. 이 방법은 스트링 별 발전 정보를 모니터링함으로써 스트링 레벨에서 태양광 발전소의 고장 여부를 검출하는 방법이다.

지역 모니터링 방법보다 보다 세밀한 모니터링이 가능한 스트링 모니터링이지만, 스트링 모니터링 방식

이 적용되지 않은 기존 태양광 발전소의 접속반에는 스트링 모니터링 기능을 지원하는 모듈이 적용되어야 한다. 이 때 가능하면 기존 접속반에도 편리하게 적용 가능하고 사용자 친화적인 스트링 모니터링 모듈이 있다면, 스트링 모니터링 방식의 확산/적용에 기여할 수 있고, 이를 통해 태양광 발전소 전반에 걸쳐 효율적인 고장 진단 및 발전량 효율 저하 방지의 효과를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 기존 태양광 발전소 접속반에 적용하기 편리하고 사용자 친화적인 스트링 모니터링 모듈의 구현 방법 개념과 테스트 결과 개요에 관한 논문이 2019년 6월에 한 국내 학술대회에서 발표되었다^[6]. 발표된 논문에서 제시한 스트링 모니터링 모듈은 클램프형 센서를 사용하여 적용 편리성을 지원하면서도 스마트 기기에 일반적으로 내장되어 사용자가 사용하기에 친숙한 WiFi 무선통신에 기반한다. 본 논문은 적용 편리성과 사용자 친화성을 지원하는 스트링 모니터링 모듈에 관심있는 독자들이 직접 설계, 구현하는데 실질적으로 도움을 주기 위해, 본 논문에서는 적용 편리성이 높은 스트링 모니터링 모듈에 관한 하드웨어 및 소프트웨어 측면에서의 구체적인 구현 방법을 기술하고, 실제 운용되는 태양광 발전소에 적용하여 테스트한 결과를 제시한다. 본 논문에서 기술하고자 하는 스트링 모니터링 모듈의 구현 방법 및 테스트 결과는 WiFi에 기반하여 태양광 발전 (PV)를 모니터링하는 방식과 관련됨으로, 본 논문에서 기술하는 적용 편리성 및 사용자 친화성 지원 스트링 모니터링 모듈에 대해 PV-WiFi 모듈이라는 용어를 사용하여 기술한다.

II. 본 론

본 논문에서는 적용 편리성을 지원하는 스트링 모니터링 모듈에 관한 구체적인 구현 방법 및 상세한 테스트 결과를 제시한다. 스트링 모니터링에 기반한 고장 진단은 ACMTs 방법에 기반한다고 할 수 있는데, ACMTs 방법에서는 스트링 별 발전 정보를 모니터링 하면서 서로 비교하는 방식으로 이상 스트링을 판별한다. 스트링 발전 정보는, 일반적인 발전량의 개념과 동일하게, 스트링에 흐르는 전류 정보와 스트링 양단의 전압 정보로 구성된다. 그런데, 태양광 발전 시스

태양광을 전기로 변환하는 시스템으로 일사량에 직접적으로 영향받고 일사량의 영향은 태양광 발전 전류량의 변화로 바로 나타난다. 다시 말해, 태양광 발전 시스템에서 태양광 발전량은 전압보다 전류에 보다 큰 연관성을 갖는다고 할 수 있으며, 기존 연구의 실험결과도 이러한 사실을 보여준다^[7]. 본 논문에서는 적용 편리성 및 사용자 친화성을 얻을 수 있는 전류 모니터링에 기반한 PV-WiFi 모듈의 구현 방법에 대해 기술하도록 하겠다.

2.1 PV-WiFi 모듈의 H/W 기능 구현

WiFi 통신에 기반하여 PV 기상 정보를 무선으로 장거리 전송하는 기능에 관한 구성 블록도는 그림 1 과 같다. WiFi 기반 PV 기상정보 무선전송 기능은 크게 3가지 블록들로 구성된다. 첫번째는 PV 접속반 스트링 전류 신호를 센싱하는 클램프형 전류센서 블록이다. 두번째는 클램프형 전류센서로부터 센싱된 아날로그 스트링 전류 신호를 디지털 신호로 변환하고 스트링 전류 정보를 추출하여 WiFi 통신으로 전송하는 PV-WiFi 무선전송 모듈이다. 세번째로는 PV-WiFi 무선전송 모듈로부터 WiFi 무선통신을 통해 전송된 PV 스트링 정보를 수신하여 사용자에게 화면으로 보여주거나 파일로 저장하는 PV 스트링 정보 수집 모듈이다. 본 논문에서는 WiFi 제어 및 PV 스트링 정보 출력/저장 처리 모듈로 오픈하드웨어이면서 WiFi 통신 기능을 내장하고 있는 라즈베리파이3를 사용하였다.

2.1.1 PV 접속반 클램프형 전류센서 블록

DC 측면에서 PV 고장 진단에 활용되는 기본적인 방법 중 하나는 PV 스트링들의 발전량을 비교하여 이상 스트링을 발견하는 방법(Adjacent String Comparison Measurement Techniques, ACMTs)으로 [5], 특히 일사량과 직접 연관된 전류의 모니터링이 중요하다. 여기에 PV 스트링 모니터링 기능이 없는



사진 출처 : [화인트랜스] 개폐형 DC전류센서(리드선형) FDS9L3, 디바이스마트, <https://www.devicemart.co.kr/goods/view?no=1382687&market=naver&NaPm=ct%3Dke9i0dns%7Cci%3D9dae950d90c0d68f3f2d5e03d9918651f82e75d8%7Ctr%3Dsls%7Csn%3D876973%7Chk%3Ddeb93dc1c48db5e4e8c06d475d4ba8e130ac5dd73>

그림 2. 설치 고 유연성을 위해 사용한 클램프형 전류센서 FDS9L3 사진

Fig. 2. Photograph of clamp-type current sensor FDS9L3 used for high flexibility of installation to PV combiner box.

레거시 접속반에도 간편하게 적용 가능할 수 있는 고 유연성을 위해서는 비접촉식 전류 센서의 사용이 추천될 수 있다. 본 설계에서는 PV 접속반에 탈부착하기 용이한 클램프형 비접촉식 전류 센서 FDS9L3를 사용하였다. 그림 2와 그림 3은 각각 FDS9L3 클램프형 DC 전류센서의 사진과 도면을 보여준다.

그림 2와 그림 3에서의 사진과 도면을 통해 알 수 있지만, 전류센서를 관통하는 스트링 전류를 센서가 센싱하는 방식으로, 입출력은 센서 전원공급용 Vdd, 접지 Gnd, 그리고 센싱된 전류에 비례하는 아날로그 신호를 출력하는 Vout으로 구성되어 있다.

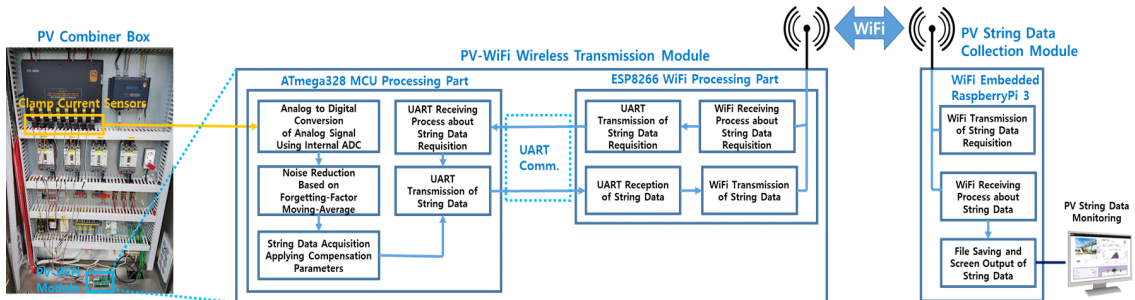
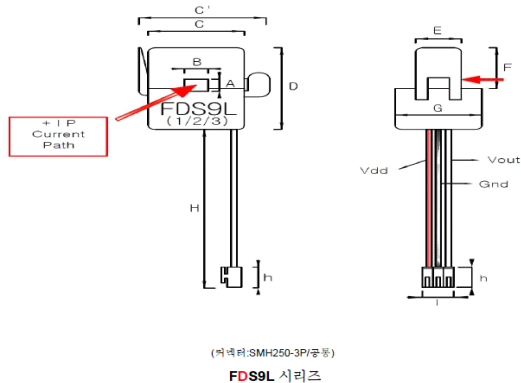


그림 1. PV-WiFi 무선전송 모듈 기능 블록도
Fig. 1. Function Block diagram of PV-WiFi Wireless Transmission Module



(여러회.SMH250-3P/중량)
FDS9L3 시리즈

위 표시된(화살)방향으로 Primary Current 입력(방향주의)

도면 출처 : [화인트랜스] 개폐형 DC전류센서(리드선형) FDS9L3, 디바이스마트, <https://www.devicemart.co.kr/goods/view?no=1382687&market=naver&NaPm=ct%3Dke9i0dns%7Cci%3D9dae950d90c0d68f3f2d5e03d9918651f82e75d8%7Ctr%3Dsls%7Csn%3D876973%7Chk%3D893dc1c48db5e4e8c06d475d4ba8e130ac5dd73>

그림 3. 설치 고유연성을 위해 사용한 클램프형 전류센서 FDS9L3 도면
Fig. 3. Drawing of clamp-type current sensor FDS9L3 used for high flexibility of installation to PV combiner box.

2.1.2 PV-WiFi 모듈의 H/W 회로 설계

본 논문에서 기술하고 있는 높은 접속반 적용 편리성과 높은 사용자 사용 편리성은 갖도록 설계된 PV-WiFi 모듈은 크게 PV 접속반 내 스트링별 클램프형 전류센서를 통해 입력되는 스트링별 아날로그 전류 신호를 디지털 신호처리하는 MCU (Micro-Controller Unit) 처리부, MCU 처리부에서 디지털 처리된 스트링별 전류값들을 WiFi 신호에 실어 무선 전송하는 WiFi 처리부, 그리고 MCU 처리부와 WiFi 처리부에 필요한 전원을 생성, 공급해주는 전원 생성부로 구성된다. 본 논문에서 구현한 PV-WiFi 모듈은 PV 접속반 내 스트링별 아날로그 전류 신호에 관한 디지털 신호처리를 수행하는 MCU 칩으로 ATmega 328을, 스트링별 디지털 전류값들을 WiFi 신호로 무선 전송하는 WiFi 칩으로 ESP8266을 사용하였다. MCU 칩 ATmega 328과 WiFi 칩 ESP8266 둘다 다른 MCU 칩이나 WiFi 칩보다 가격 측면에서 저렴한 장점을 지니므로, 이 두 가지 칩을 사용한 PV-WiFi 모듈을 구현하여 상용화할 경우에는 높은 가격 경쟁력을 갖출 수 있다고 말할 수 있다.

1) PV-WiFi 모듈의 ATmega 328 MCU 처리부

PV-WiFi 무선전송 모듈에서 ATmega328 MCU 처리부는 PV 접속반 스트링에 부착된 전류센서로부터의 아날로그 전류 신호를 입력받아 ADC를 통해 디

지탈로 변환 후 센싱 잡음을 억제하고 스트링 전류 정보를 추출하여 ESP8266 WiFi 처리부로 전달하는 역할을 수행한다. 이러한 이러한 일련의 신호 처리 과정에는 일반적으로 MCU가 널리 사용된다. 본 논문에서 수행한 PV-WiFi 무선전송 모듈의 설계에는 오픈하드웨어인 아두이노 보드에 장착되어 있으며 저사양이지만 저렴하게 구매 가능하여 센싱 응용 등에 적합한 Atmel사의 ATmega328을 사용하였다. 일반적인 아두이노 보드에 장착되어 있는 ATmega328 MCU이기 때문에 아두이노 통합 개발 환경(Integrated Development Environment, IDE)를 사용할 수 있다. 이 때, 컴퓨터에서 프로그래밍/컴파일된 MCU 포팅 파일은 FTDI 모듈 등을 거쳐 ATmega328의 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 포트를 통해 업로딩된다.

그림 4는 본 논문에서 설계한 PV-WiFi 무선전송 모듈 하드웨어 시작품 회로 중 PV 접속반 스트링 전류센서에서 센싱된 아날로그 전류 신호에 대한 일련의 신호 처리를 수행하는 ATmega328 MCU 및 관련 주변 기기 연결 포트에 관한 회로도들을 보여준다. RESET 포트는 ATmega328 MCU의 리셋에 사용 가능하고, J1, J3 포트는 ATmega328 MCU의 주요 입출력 신호들을 외부로 노출하여 테스트에 활용하기 위한 포트이며 J4로 표기된 I/F 포트는 ATmega328 MCU에 부트로더(Bootloader)를 올릴 때 사용하는 포트이다. J2로 표기된 AREF_JUMPER 포트는 아날로그 전류 신호를 디지털 신호로 변환할 때 사용되는 참조 전압 (Reference Voltage)로 3.3V 또는 5V 중 하나로 선택할 때 사용되는 포트이고, J5부터 J12까지 8개의 포트에는 각각 PV 접속반 스트링에 부착된 클램프형 전류센서 FDS9L3의 입출력 포트가 연결된다. J13 포트는 클램프형 전류센서 FDS9L3의 전원 공급원으로 3.3V 또는 5V 중 하나로 선택할 때 사용된다.

2) PV-WiFi 모듈의 ESP8266 WiFi 처리부

PV-WiFi 무선전송 모듈에서 ESP8266 WiFi 처리부는 PV 스트링 정보 수집 모듈과 WiFi 통신을 연결한 후 ATmega328 MCU 처리부로부터 UART 통신을 통해 전달받은 PV 스트링 정보를 WiFi 통신으로 PV 스트링 정보 수집 모듈로 전송하는 역할을 수행한다. WiFi 기술은 비면허 대역 사용으로 무선통신 비용이 없으며, 기술 정착되어 안정 운용이 가능할 뿐만 아니라, 스마트기기에 기본으로 내장된 WiFi 통신 기능을 통해 스마트기기에서 모니터링 용이하다는 장점이 있다. 특히, 스마트 홈 등의 여러 IoT 분야에서 널

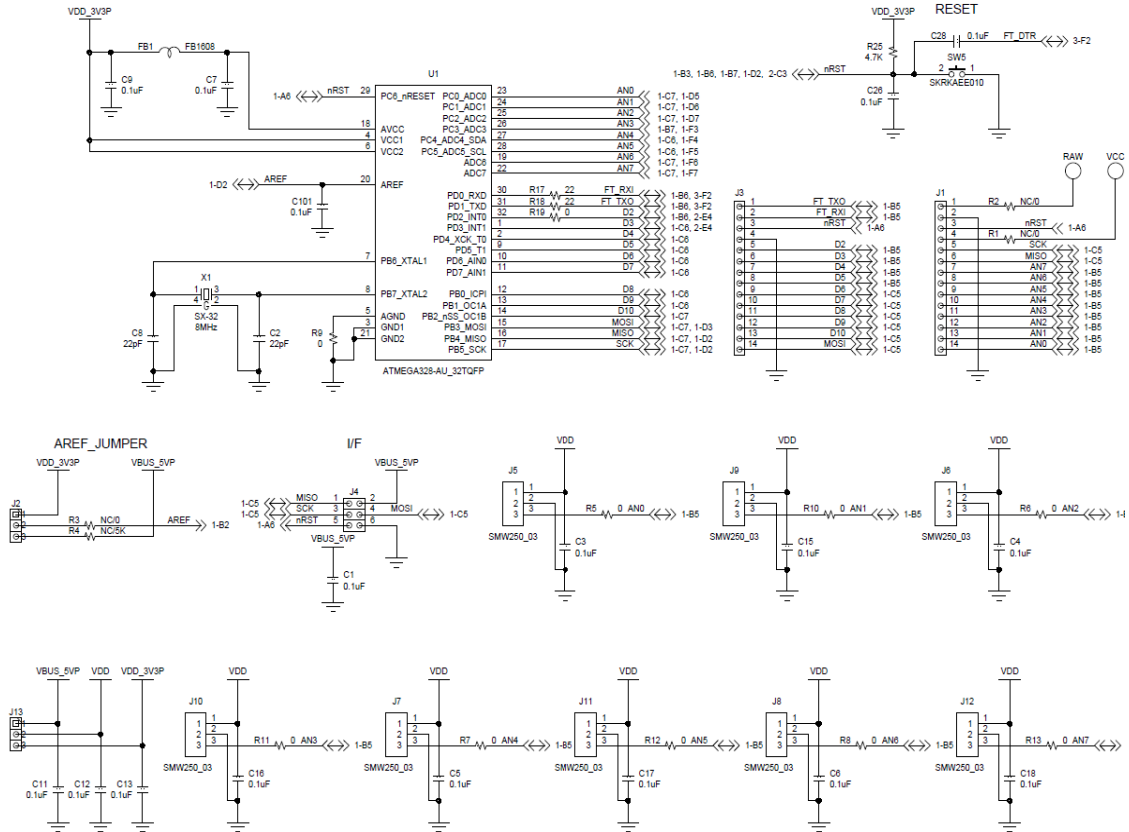


그림 4. PV-WiFi 모듈의 ATmega328 MCU 처리부에 관한 회로도
 Fig. 4. Schematic of ATmega328 MCU processing part of PV-WiFi module.

리 사용되는 Espressif사 ESP8266 칩은 다른 WiFi 칩들보다 상당히 저렴하여, ESP8266 칩에 기반한 PV 접속반 스트링 모니터링 모듈의 개발 및 구현은 대량 생산을 통한 기술의 상용화 시에 가격 경쟁력 측면에서 우위를 확보할 가능성이 있다. 본 설계에서는 이러한 장점을 지닌 Espressif사 ESP8266 칩을 WiFi 처리부에 사용하였다.

그림 5는 ESP8266 WiFi 처리부에 관한 회로도를 보여준다. PV 스트링 정보 수집 모듈과의 WiFi 신호 송수신은 P1으로 표기된 SMA 커넥터에 연결된 안테나를 통해 이루어지게 된다. ATmega328 MCU 처리부로부터 PV 스트링 정보를 전달받거나 ESP8266 프로그래밍 파일을 업로드하기 위해 ESP8266 칩의 25, 26번 핀으로 구성된 UART 통신을 사용하게 된다. 스위치 SW6로 표기된 Selection Interface 블록은 ESP8266 프로그래밍 파일을 업로드하거나 ATmega328 MCU 처리부와 UART 통신할 때 어떤 기능을 선택할지에 관해 설정하는 기능을 한다. ESP8266 칩 UART 포트와 연결된 E_TX, E_RX 선

이 EXT_RXD, EXT_TXD와 연결되면, ESP8266 프로그래밍 파일을 업로드할 수 있는 상태가 된다. 그렇지 않고 E_TX, E_RX 선이 ATmega328 칩과 연결된 D2, D3 선과 연결되면, ESP8266 칩이 ATmega328 칩과 UART로 통신하는 평소 동작 상태가 된다. 스위치 SW1로 표기된 Set Firmware Mode 블록은 ESP8266 칩이 평소 동작 상태로 설정될지, ESP8266 프로그래밍 파일 업로드 상태로 설정될지를 선택할 때 사용된다. ESP8266 칩과 연결된 E_FW 선이 3.3V에 연결된 상태라면, ESP8266은 평소 동작 상태가 된다. 그렇지 않고 E_FW 선이 접지와 연결된 상태라면, ESP8266 칩에 프로그래밍 파일을 업로드할 수 있는 상태가 된다. 정리하면, ESP8266 칩을 평소 동작 상태 또는 프로그래밍 파일 업로드 상태로 설정하기 위해서는 스위치 SW6와 SW1을 동시에 적절하게 스위칭해 놓아야 한다. U2로 표기된 Flash Memory 블록은 ESP8266 칩이 원하는대로 동작하도록 프로그래밍해 놓은 프로그래밍 파일을 저장하는 역할을 수행한다.

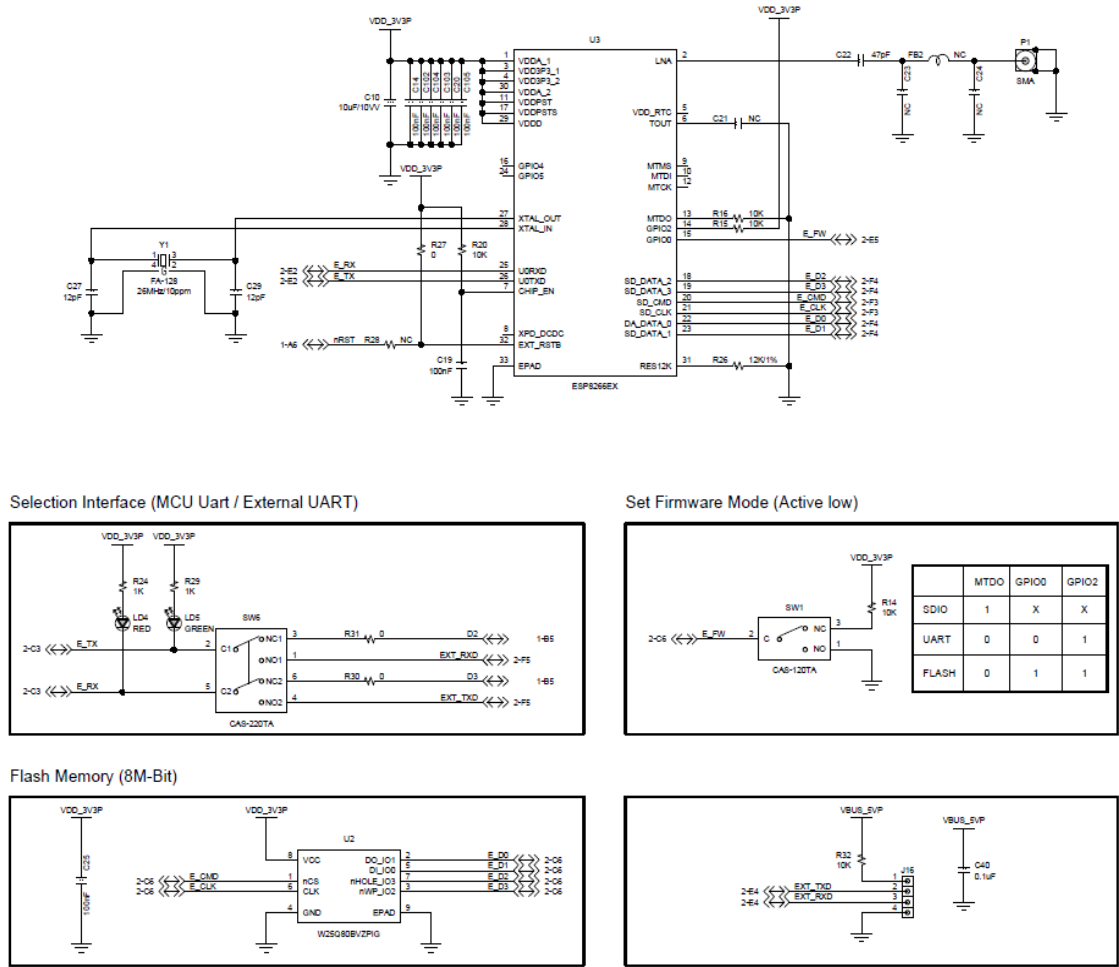


그림 5. PV-WiFi 모듈의 ESP8266 WiFi 처리부에 관한 회로도
Fig. 5. Schematic of ESP8266 WiFi processing part of PV-WiFi module.

3) PV-WiFi 모듈의 전원생성부

본 논문에서 설계한 PV-WiFi 무선전송 모듈은 크게 ATmega328 MCU 처리부와 ESP8266 WiFi 처리부로 구성되는데, 이 블록들에서는 주전원으로 3.3V 직류가 사용된다. 그림 6은 본 논문에서 설계한 3.3V 직류 전원 생성 모듈에 관한 회로도이다. 본 논문에서 설계한 PV-WiFi 무선전송 모듈은 2가지 방법으로 전원을 공급받는 형식으로 설계되었다. 첫번째는 스마트폰에 널리 사용되는 micro-USB 단자를 장착하여 스마트폰 충전기로부터 5V를 공급받아 3.3V 전원을 생성하는 방법이다. micro-USB 단자를 통해 입력되는 5V 직류를 3.3V 직류로 변환하기 위해 그림 5에 보이는 TPS73033 LDO regulator를 사용하였다. 두번째로는 AA 건전지 또는 AAA 건전지 등으로 구성된 배터리 팩으로부터 전원을 공급받는 방식이다. 배터리 팩

은 J17로 표기된 포트에 연결 가능하다. 스마트폰 충전기 전원 공급이나 배터리 팩 전원 공급을 선택할 때에는 스위치 SW7의 스위칭 설정과 SW3 점퍼 설정을 통해 이루어진다.

2.1.3 PV-WiFi 무선전송 모듈의 H/W 시작품

이 세부 절에서는 앞에서 기술한 PV-WiFi 무선전송 모듈의 설계에 따라 제작된 PV-WiFi 무선전송 모듈 하드웨어 시작품의 제작 결과물에 관해 기술한다. 그림 7과 8은 각각 PV-WiFi 무선전송 모듈의 CAD 도면이라 할 수 있는 PCB 레이아웃 (layout)과 시작품을 보여준다. 제작된 PV-WiFi 무선전송 시작품은 크게 스트링 전류센서 연결부, ATmega328 MCU 처리부, ESP8266 WiFi 처리부, 전원생성부 등으로 구성됨을 그림 7의 PCB 레이아웃으로부터 볼 수 있다.

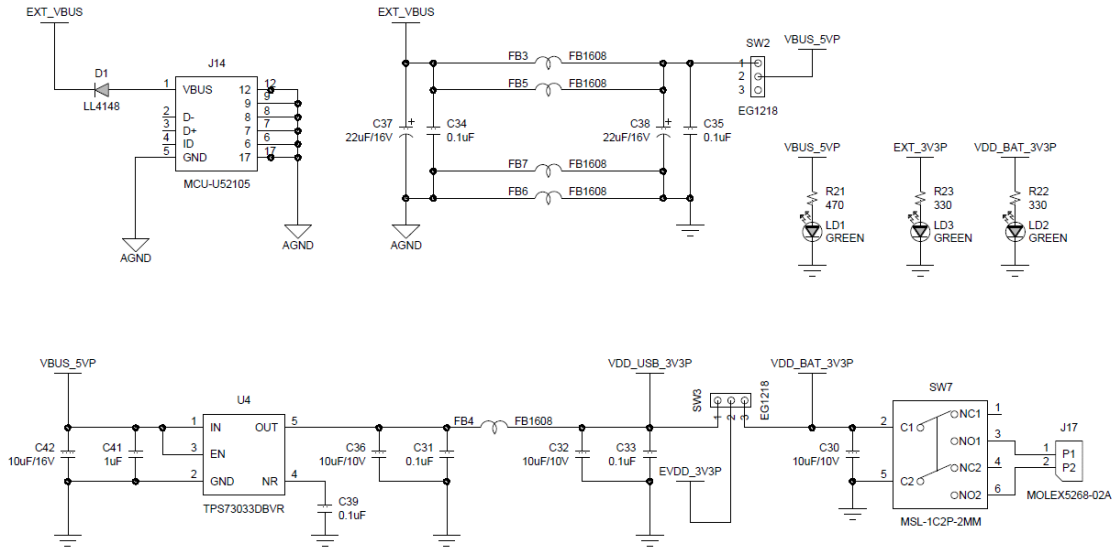


그림 6. PV-WiFi 모듈의 전원생성부에 관한 회로도
Fig. 6. Schematic of power generation part of PV-WiFi module.

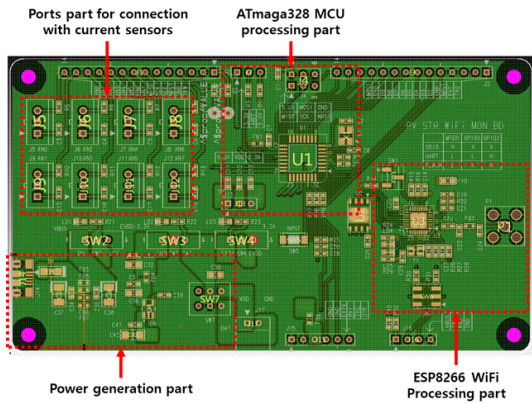


그림 7. PV-WiFi 모듈의 PCB 레이아웃
Fig. 7. PCB layout of PV-WiFi module.

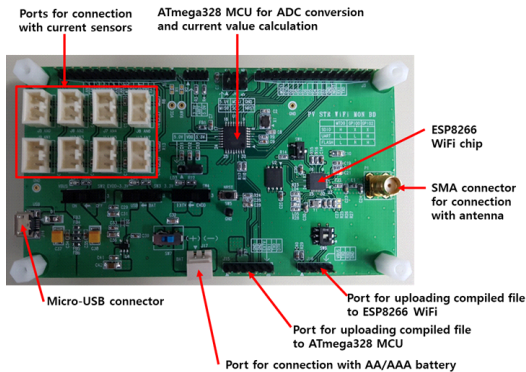


그림 8. PV-WiFi 기능 구현을 위한 H/W 시작품
Fig. 8. Hardware prototype for implementation of PV-WiFi function.

그림 8의 시작품 사진을 살펴보면, 앞에서의 설계 내용에 기술한 바와 같이, PV-WiFi 무선전송 모듈에 사용된 주요 칩들은 아날로그 스트링 전류 신호 처리용 ATmega328과 WiFi 통신용 ESP8266으로 구성된다. 그 외에 ATmega328 MCU 프로그래밍 파일 업로드 포트, ESP8266 WiFi 프로그래밍 파일 업로드 포트, 스마트폰 충전기 등으로부터 전원을 공급받을 수 있는 micro-USB 커넥터, AA/AAA 배터리 전원 연결 포트, WiFi 안테나 부착용 SMA 커넥터 등이 시작품 보드에 장착되어 있음을 그림 8로부터 볼 수 있다.

2.2 PV-WiFi 모듈 S/W 기능 구현

앞에서 PV-WiFi 무선전송 모듈의 하드웨어 기능 설계에 관해 설명하였다. 여기에서는 PV-WiFi 무선전송 모듈의 소프트웨어 기능 설계에 관해 기술한다. 그림 1의 기능 구성 블록도에서 보여지듯이, PV-WiFi 무선전송 모듈의 소프트웨어도 크게 ESP8266 WiFi 처리부와 ATmega328 MCU 처리부로 구성된다.

2.2.1 PV-WiFi 모듈의 ESP8266 WiFi 처리부

ESP8266 WiFi 처리부는 PV 스트링 정보 수집 모듈로부터 WiFi 통신을 통해 수신된 스트링 정보 요청 패킷을 UART 통신을 통해 ATmega328 MCU 처리부로 전달하거나, ATmega328 MCU 처리부에서 UART 통신을 통해 수신된 PV 스트링 모니터링 데이터를 WiFi 통신을 통해 PV 스트링 정보 수집 모듈로 전송하는 기능을 수행한다.

그림 9는 ESP8266 WiFi 처리부의 초기 설정에 관한 프로그램 및 주석을 보여준다. 초기동작 설정에 관한 프로그램 소스는 PV-WiFi 무선전송 모듈이 ESP8266 칩을 사용하기 때문에 ESP8266 WiFi 라이브러리를 링크하는 것으로 시작하고, WiFi 서버로서 동작하는 PV-WiFi 무선전송 모듈의 IP주소, 네트워크 이름, 네트워크 Password 등을 설정한다. 그리고, 내부에서 사용할 데이터 버퍼에 관한 설정이 이루어지고, 웹 서버로의 설정 또한 이루어진다. 그 다음으로, ATmega328 MCU 처리부와 데이터를 주고 받는 UART에 관한 속도 설정 및 구동이 이루어지며, 서버로서의 WiFi 설정이 이루어지고 서버로서의 PV-WiFi 무선전송 모듈의 WiFi 서버 구동이 수행된다.

그림 10은 ESP8266 WiFi 처리부의 일반 동작에 관한 프로그래밍을 보여준다. 일반 동작에 관한 프로그램 소스는 PV 스트링 정보 수집 모듈에 관한 WiFi Client 변수를 설정하는 것으로 시작한다. 그리고, Client로 동작하는 PV 스트링 정보 수집 모듈의 접속 여부를 확인한다. PV 스트링 정보 수집 모듈의 접속 유지 여부가 확인되면, PV 수집 모듈로부터의 스트링 정보 요청 패키지가 WiFi 통신을 통해 수신되었는지 여부를 확인한다. 스트링 정보 요청 패키지의 수신이 확인되면, 스트링 정보 요청 패키지를 ATmega328 MCU로 전송하는데 필요한 전송 데이터 버퍼를 초기화하고 WiFi 통신을 통해 수신한 스트링 정보 요청 패키지를 수신 데이터 버퍼에 저장한다. 그 다음 단계로, 수신

```
#include <ESP8266WiFi.h> ← ESP8266 WiFi library link

IPAddress addr(192, 168, 1, 1); ← Setting IP address of PV-WiFi module as a server

char ssid[] = "TestSoftAP_Wee"; ← Setting SSID (Service Set Identifier) of PV-WiFi module as a server
char pass[] = "12345678"; ← Setting password of PV-WiFi module as a server

int status = WL_IDLE_STATUS;

#define in_bytes_size 128 ← Setting size of data buffer
byte in_bytes[in_bytes_size]; ← Declaring array for receiving data buffer
byte in_bytes_length; ← Declaring variable for data length
byte bytes_from_serial_port[in_bytes_size]; ← Declaring array for transmitting data buffer

WiFiServer server(80); ← Setting web server

void setup() {

    Serial.begin(9600); ← Setting UART with specific baud rate and starting
    delay(10);

    WiFi.mode(WIFI_AP);
    WiFi.softAPConfig(addr, addr, {255, 255, 255, 0});
    WiFi.softAP(ssid, pass); ← Setting WiFi as a server

    server.begin(); ← Starting WiFi server of PV-WiFi module as a server
}
```

그림 9. ESP8266 WiFi 처리부의 초기 설정에 관한 프로그램 및 주석
Fig. 9. Program and comments for initial setup of EXP8266 WiFi processing.

```
void loop() {

    WiFiClient client = server.available(); ← Declaring WiFi client variable for PV data collection module

    if (client) { ← Checking existence of PV data collection module as a client
        while (client.connected()) { ← Checking connection of PV data collection module as a client

            if (client.available()) { ← Checking WiFi data received from PV data collection module
                for (int i = 0; i < in_bytes_size; i++) {
                    bytes_from_serial_port[i] = '0'; ← Initializing buffer for data transferring to ATmega328 MCU
                }
                in_bytes_length = client.readBytes(in_bytes, in_bytes_size); ← Saving WiFi data
                for (int i = 0; i < in_bytes_length; i++) {
                    bytes_from_serial_port[i] = in_bytes[i]; ← Copying WiFi data as a request to buffer for data transferring to ATmega328 MCU
                }
                bytes_from_serial_port[in_bytes_length] = '0'; ← Inserting null character

                Serial.write(bytes_from_serial_port, in_bytes_length); ← Transferring WiFi data as a request to ATmega328 MCU via UART
            }

            if (Serial.available()) { ← Checking UART data received from ATmega328 MCU
                for (int i = 0; i < in_bytes_size; i++) {
                    bytes_from_serial_port[i] = '0'; ← Initializing buffer for data transmitting to PV data collection module
                }
                in_bytes_length = Serial.readBytes(in_bytes, in_bytes_size); ← Saving UART data
                for (int i = 0; i < in_bytes_length; i++) {
                    bytes_from_serial_port[i] = in_bytes[i]; ← Copying UART data to buffer for data to PV data collection module
                }
                bytes_from_serial_port[in_bytes_length] = '0'; ← Inserting null character

                client.write(bytes_from_serial_port, in_bytes_length); ← Transmitting UART data as a string monitoring data to PV data collection module via WiFi
            }
        }
    }
}
```

그림 10. ESP8266 WiFi 처리부의 일반 동작에 관한 프로그램 및 주석
Fig. 10. Program and comments for normal operation of EXP8266 WiFi processing.

데이터 버퍼에 저장된 스트링 정보 요청 패키지를 UART 통신을 통해 ATmega328 MCU 처리부로 전송하기 위해 설정했던 전송 데이터 버퍼로 복사한다. PV 스트링 정보 수집 모듈로부터 WiFi 통신을 통해 수신한 스트링 정보 요청 패키지를 ATmega328 MCU 처리부로 UART 통신으로 전달하기 위한 마지막 단계로 Serial.write() 함수를 통해 스트링 정보 요청 패키지를 UART 통신을 통해 ATmega328 MCU 처리부로 전송한다.

ATmega328 MCU 처리부로 UART 통신으로 전달받은 PV 스트링 모니터링 데이터를 WiFi 통신을 통해 PV 스트링 정보 수집 모듈로 전달하는 과정은 스트링 정보 요청 패키지의 전달 과정의 역순이라 할 수 있다. 우선, ATmega328 MCU 처리부로부터 PV 스트링 모니터링 데이터가 UART 통신을 통해 수신되었는지 여부를 확인한다. PV 스트링 모니터링 데이터가 수신되었다면, PV 스트링 정보 수집 모듈로 WiFi 통신을 통해 전달하는데 필요한 전송 데이터 버퍼를 초기화하고 수신 데이터 버퍼에 UART 통신을 통해 수신된 PV 스트링 모니터링 데이터를 저장한다. 그 다음 단계로 수신 데이터 버퍼에 저장된 PV 스트링 모니터링 데이터를 WiFi 통신을 통해 전송하기 위해

설치하였던 전송 데이터 버퍼로 복사한다. ATmega328 MCU 처리부로부터 UART 통신을 통해 수신한 PV 스트링 모니터링 데이터를 WiFi 통신을 통해 PV 스트링 정보 수집 모듈로 전달하기 위한 마지막 단계로 'client.write' 함수를 통해 PV 스트링 모니터링 데이터를 WiFi 통신을 통해 PV 스트링 정보 수집 모듈로 전송한다.

2.2.2 PV-WiFi 모듈의 ATmega328 MCU 처리부

ATmega328 WiFi 처리부는 PV 접속반에 부착된 클램프형 전류센서 블록으로부터 아날로그 스트링 전류 신호를 입력받아, ADC를 통해 아날로그 전류 신호를 디지털 신호로 변환하고, Forgetting-Factor Moving-Average에 기반하여 센싱 잡음을 억제시킨 후, 선형회귀 함수에 기반하여 추출된 보정 파라미터를 적용하여 스트링 전류값을 추출하고 저장한다. 그리고 ESP8266 WiFi 처리부와 UART 통신을 통해 수신된 스트링 정보 요청 패키지의 수신 여부 확인하고, 스트링 정보 요청 패키지의 수신여 확인되면 저장되었던 스트링 전류값을 UART 통신을 통해 ESP8266 WiFi 처리부로 전달하는 역할을 수행한다.

그림 11은 ATmega328 MCU 처리부가 ESP8266 WiFi 처리부와 데이터를 주고 받는 통로로 사용되는 UART 통신용 포트 및 데이터 버퍼 설정을 보여준다. ATmega328 MCU는 하드웨어 상에서 지원하는 UART 포트는 1쌍(RXD+TXD)이다. 하드웨어 UART 포트 1쌍은 일반적으로 아두이노 IDE 상에서 컴파일된 파일을 업로드하거나 특정 메시지 출력을

```
#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial SoftSerial(2, 3);

////////////////////////////////////
#define in_bytes_size 128
byte in_bytes[in_bytes_size];
byte in_bytes_length;
byte bytes_from_serial_port[in_bytes_size];
////////////////////////////////////

////////////////////////////////////
#define tx_bytes_size 64
uint8_t tx_packet[tx_bytes_size];
int tx_index;
bool request_on = false;
int packet_count = 0;
////////////////////////////////////
```

그림 11. UART 통신용 포트 및 데이터 버퍼 설정
Fig. 11. Setting of ports and data buffer for UART communication.

```
float regressSlope_1 = 0.067604941;
float regressSlope_2 = 0.068608495;
float regressSlope_3 = 0.072344623;
float regressSlope_4 = 0.069527843;
float regressSlope_5 = 0.073529412;
float regressSlope_6 = 0.066634959;
float regressSlope_7 = 0.06283201;
float regressSlope_8 = 0.068974166;

float regressOffset_1 = 52.88949665;
float regressOffset_2 = 53.2604628;
float regressOffset_3 = 57.68990464;
float regressOffset_4 = 54.48549396;
float regressOffset_5 = 58.03074866;
float regressOffset_6 = 51.63738793;
float regressOffset_7 = 49.53704233;
float regressOffset_8 = 54.23438676;
```

그림 12. 전류 계산 파라미터 설정
Fig. 12. Setting of current calculation parameters.

통한 디버깅용으로 사용된다. 본 논문에서는 일반 GPIO (General-Purpose Input/Output) 포트를 통하여 UART 통신을 구동하기 위해 소프트웨어적으로 해결하였다. 그림 11의 윗부분에 보여지듯이, SoftwareSerial 라이브러리를 링크하고 SoftwareSerial 포트를 선언함으로써, 2번과 3번 GPIO 포트를 통한 소프트웨어 UART 통신을 설정하였다.

그림 12는 PV 접속반 내 스트링에 부착된 클램프형 전류 센서로부터 수신한 아날로그 전류 신호로부터 전류값을 계산하는데 사용되는 전류 계산 파라미터에 관한 설정을 보여준다.

그림 13은 ATmega328 MCU 처리부의 초기 설정을 보여준다. 초기 설정은 UART 통신 속도 지정 및 구동 선언으로 이루어진다. Serial.begin() 함수로 선언된 UART 통신은 하드웨어 UART 통신 포트으로써, 특정 메시지를 터미널로 출력하는 방식으로 디버깅용으로 활용된다. 그리고, 그림 11에서 선언된 소프트웨

```
void setup() {

    Serial.begin(9600);
    SoftSerial.begin(9600);

    delay(10);
}
```

그림 13. ATmega328 MCU 처리부의 초기 설정
Fig. 13. Initial setup of ATmega328 MCU processing.

어 UART 통신인 SoftSerial를 통해 ESP8266 WiFi 처리부와 데이터를 주고 받는다. 디버깅용 하드웨어 UART 포트와 ESP8266 WiFi 처리부 통신용 소프트웨어 UART 포트 모두 본 논문에서 설계된 PV-WiFi 모듈에서는 9600 속도로 설정되었다.

그림 14는 PV 스트링 모니터링 데이터의 UART 전송에 관한 프로그램을 보여준다. 구체적으로, 전류 센서로부터 수신한 아날로그 전류 신호로부터 계산된 스트링 전류값들, 즉 PV 스트링 모니터링 데이터를 소프트웨어 UART 포트를 통해 ESP8266 WiFi 처리부로 전송하는 기능에 관한 프로그램이다. PV 스트링 데이터 수집 모듈로부터 WiFi 통신을 통해 수신한 데이터 요청 패키지가 검출되면, 데이터 요청 패키지의 수신 상태를 나타내는 변수 request_on은 true 값이 된다. 즉, 변수 request_on의 변수값이 true인 상태는 데이터 요청 패키지가 수신됨을 나타내므로, 저장하고 있던 스트링 전류 모니터링 데이터를 ESP8266 WiFi 처리부로 전송하는 기능을 수행한다. UART 통신을 통해 스트링 모니터링 데이터 전송하기 위한 첫 단계로 실수 상태로 저장된 스트링 전류값들을 ftoa() 함수를 통해 스트링 상태로 변환하여 저장한다. 그리고, sprintf()

```
void loop() {
    if (request_on == true) {
        if (packet_count == 256) {
            packet_count = 0;
        } else {
            packet_count++;
        }

        ftoa(current_str_1, current_1, 2);
        ftoa(current_str_2, current_2, 2);
        ftoa(current_str_3, current_3, 2);
        ftoa(current_str_4, current_4, 2);
        ftoa(current_str_5, current_5, 2);
        ftoa(current_str_6, current_6, 2);
        ftoa(current_str_7, current_7, 2);
        ftoa(current_str_8, current_8, 2);

        tx_index = sprintf(tx_packet, "%s", preamble);
        tx_index += sprintf((char*)tx_packet + tx_index, "%s", current_str_1);
        tx_index += sprintf((char*)tx_packet + tx_index, "%s", current_str_2);
        tx_index += sprintf((char*)tx_packet + tx_index, "%s", current_str_3);
        tx_index += sprintf((char*)tx_packet + tx_index, "%s", current_str_4);
        tx_index += sprintf((char*)tx_packet + tx_index, "%s", current_str_5);
        tx_index += sprintf((char*)tx_packet + tx_index, "%s", current_str_6);
        tx_index += sprintf((char*)tx_packet + tx_index, "%s", current_str_7);
        tx_index += sprintf((char*)tx_packet + tx_index, "%s", current_str_8);
        tx_index += sprintf(tx_packet + tx_index, "%d", tx_index);
        tx_index += sprintf(tx_packet + tx_index, "%d#", packet_count);

        SoftSerial.write((uint8_t*)tx_packet, tx_index);
        request_on = false;
    }
}
```

그림 14. PV 스트링 모니터링 데이터의 UART 전송
Fig. 14. UART transmission of PV string monitoring data.

함수를 통해 각각 분산되어 저장되었던 스트링 전류값들을 구분자 역할을 하는 문자 “#”와 함께 하나의 스트링으로 묶는다. 그리고, Software.write() 함수를 통해 소프트웨어 UART 포트를 통해 ESP8266 WiFi 처리부로 하나의 스트링으로 묶인 스트링 모니터링 데이터를 전송한다. 마지막으로 request_on 변수를 false 상태로 바꾸어 PV 스트링 모니터링 데이터 수집 모듈로부터 WiFi 통신을 통해 전송되는 데이터 요청 패키지의 검출 대기 상태임을 나타낸다.

그림 15는 UART 수신 스트링 데이터 요청 패키지 수신 처리에 관한 프로그램을 보여준다. WiFi 기반 PV 스트링 모니터링은 PV 스트링 데이터 수집 모듈이 데이터 요청 패키지를 WiFi 통신을 통해 PV-WiFi 모듈로 송신하는 과정으로부터 시작된다. 그림 15는 WiFi 통신을 통해 수신된 데이터 요청 패키지가 소프트웨어 UART 포트를 통해 수신되었을 때의 처리 과정에 대해 보여준다. 우선, SoftSerial.available() 함수를 통해 소프트웨어 UART 포트를 통해 ESP8266 WiFi 처리부에서 전송된 데이터가 존재하는지를 확인한다. ESP8266 WiFi 처리부로부터 수신된 UART 데이터가 있다면, 수신 UART 데이터에 관한 버퍼 byte_from_serial_port를 널 문자로 초기화한 후 SoftSerial.readBytes() 함수를 통해 수신 UART 데이터를 버퍼 byte_from_serial_port에 저장한다. 본 논문에서는 데이터 요청 패키지의 맨 앞에 1 바이트의 특정 문자열을 프리앰블 역할로 설정하였는데, 수신 UART 데이터를 저장한 버퍼 byte_from_serial_port의 처음 8비트를 설정한 프리앰블과 비교하여 데이터 요청 패키지임을 확인한다. 데이터 요청 패키지가 맞다면, 데이터

```
} else {
    if (SoftSerial.available()) {
        for (int i = 0; i < in_bytes_size; i++) {
            bytes_from_serial_port[i] = '0';
        }
        in_bytes_length = SoftSerial.readBytes(in_bytes, in_bytes_size);
        for (int i = 0; i < in_bytes_length; i++) {
            bytes_from_serial_port[i] = in_bytes[i];
        }
        bytes_from_serial_port[in_bytes_length] = '0';

        if ((bytes_from_serial_port[0] = 0x52) && (bytes_from_serial_port[1] = 0x65) &&
            Serial.write(bytes_from_serial_port, in_bytes_length);
            request_on = true;
        } else {
            printf("Incorrectly Receiving\n");
            request_on = false;
        }
    }
}
```

그림 15. UART 수신 스트링 데이터 요청 패키지 수신 처리
Fig. 15. Reception process for string data request packet received via UART.

요청 패킷 수신 상태를 나타내는 변수 request_on을 true 상태로 전환하고, 하드웨어 UART 포트를 통해 수신된 데이터 요청 패킷을 터미널로 출력하여 사용자가 데이터 요청 패킷 수신 여부를 확인할 수 있다. 그렇지 않고 처음 8비트가 설정한 프리앰블이 아니라면, 데이터 요청 패킷 수신 상태를 나타내는 변수 request_on을 false 상태로 유지하여 데이터 요청 패킷의 수신을 대기하고 있음을 나타낸다.

그림 16의 프로그램에서 보여지듯이, 계산 파라미터 regressSlop은 전류 센서의 센싱 신호와 실제 전류값 사이의 비례 계수 역할을 하고, 계산 파라미터 regressOffset은 전류 센서의 오프셋을 제거하는 역할을 한다. 클램프 타입의 전류 센서는 센싱하고자 하는 장치나 전선의 수정, 분해, 재조립 등을 필요로 하지 않고 쉽게 부착 가능한 높은 적용 편리성을 가지는 반면, 잡음의 영향을 상당히 많이 받을 수 있다. 이러한 클램프형 전류 센서에서의 잡음 영향을 억제하기 위해, 본 논문에서 설계된 PV-WiFi 모듈에서는 forgetting-factor moving-average라는 방식을 적용하였다. moving-average는 평균 대상으로 최근 값들 위주로 사용하는 이동 평균 방식이고, forgetting-factor는 시간이 지난 정도에 따라 평균에 미치는 영향을 줄이는 정도를 지정하는 파라미터이다. 그림 16의 프로그램에서 mov_avg 변수가 forgetting-factor moving-average 방식으로 계산되는 이동 평균값이고,

```
sensingADC_1 = analogRead(A0);
currentValue_1 = sensingADC_1 + regressSlope_1;
currentValue_1 = currentValue_1 - regressOffset_1;
mov_avg_1 = ((1.000 - forget_fac) + mov_avg_1) + (forget_fac * currentValue_1);
delay(12);

sensingADC_2 = analogRead(A1);
currentValue_2 = sensingADC_2 + regressSlope_2;
currentValue_2 = currentValue_2 - regressOffset_2;
mov_avg_2 = ((1.000 - forget_fac) + mov_avg_2) + (forget_fac * currentValue_2);
delay(12);

sensingADC_3 = analogRead(A2);
currentValue_3 = sensingADC_3 + regressSlope_3;
currentValue_3 = currentValue_3 - regressOffset_3;
mov_avg_3 = ((1.000 - forget_fac) + mov_avg_3) + (forget_fac * currentValue_3);
delay(12);
```

그림 16. 전류 계산 파라미터 및 forgetting-factor moving-average 적용
Fig. 16. Applying of current calculation parameters and forgetting-factor moving-average.

forget_fac 상수 변수가 시간에 따른 평균 가중치를 결정하는 파라미터이다. 그림 16의 프로그램에서 보여지듯이, forgetting-factor moving-average 방식은 어레이 형식의 변수를 필요로 하지 않을 뿐더러 나눗셈 없는 덧셈, 곱셈의 간단한 수식을 통해 계산이 이루어지기 때문에, MCU에서 계산에 필요한 자원과 전력을 거의 사용하지 않으면서 이동 평균값을 계산을 수행한다.

III. 실험

이전 장에서는 태양광 발전 접속반에 적용하기 편리한 스트링 발전 무선 모니터링 PV-WiFi 모듈에 관한 하드웨어 및 소프트웨어의 구체적인 구현 방법을 기술하였다. 이 장에서는 실제 운용되는 태양광 발전소에 PV-WiFi 모듈을 적용한 모습과 PV-WiFi 모듈에 기반하여 스트링 발전 무선 모니터링을 실행한 테스트 결과를 기술한다.

그림 17은 실제 운용되는 30kW 태양광 발전소 접속반에 PV-WiFi 모듈을 적용한 모습을 보여준다. 30kW 태양광 발전소는 총 8 개의 스트링으로 구성되

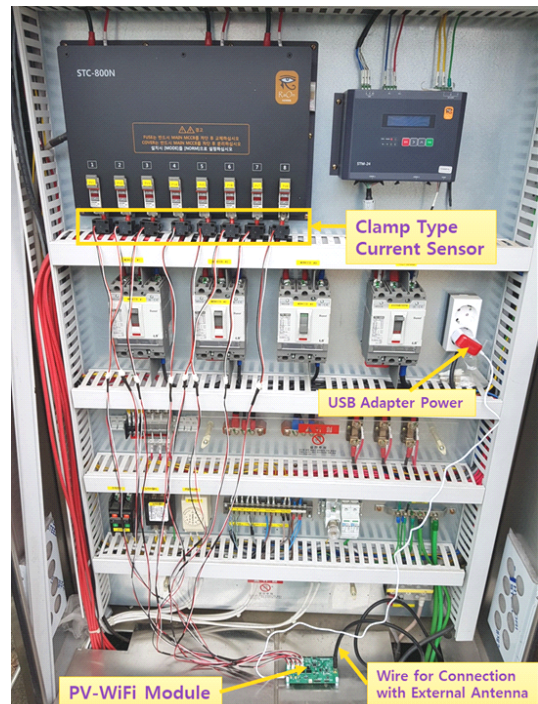


그림 17. 30kW 태양광 발전소 접속반에 PV-WiFi 모듈을 적용한 모습
Fig. 17. PV-WiFi module applied to combiner box in 30kW PV plant.

는데, 그림 17에서 8개의 클램프형 전류 센서가 8개의 스트링 전선에 부착되어 있음을 볼 수 있다. 클램프형 센서이기 때문에 접속만 내 스트링 전선 또는 장치를 수정, 분해, 재조립하지 않고 쉽고 편리하게 부착할 수 있다. 클램프형 전류 센서에서 센싱된 아날로그 센싱 신호는 센서 전선을 통해 PV-WiFi 모듈로 전달된다. 그 후, ATmega328 MCU 처리부에서 아날로그 센싱 신호로부터 실제 스트링 전류값들을 forgetting-factor moving-average를 통해 잡음을 억제 하면서 계산하고 ESP3266 WiFi 처리부로 UART 통신을 통해 전달한다. ESP3266 WiFi 처리부는 전달된 스트링 전류값들에 관한 WiFi 신호 처리 후 WiFi 통신으로 스트링 데이터 수집 모듈로 전송한다. 태양광 발전소 접속반은 방진, 방수 등을 위해 금속 케이스로 구성되는 경우가 일반적인데, 접속반 금속 케이스에 PV-WiFi 모듈을 위치해 놓으면 PV-WiFi 모듈을 위한 별도의 케이스를 필요로 하지 않을 수 있다. 다만, 이렇게 PV-WiFi 모듈을 접속반 금속 케이스 내에 위치해 둘 경우에 전파는 금속 케이스를 통과하기 어려우므로, 그림 17의 왼쪽 하단부에서 보여지듯이, 접속반 케이스 외부에 WiFi 안테나를 부착 또는 설치하고 연장선을 통해 PV-WiFi 모듈과 WiFi 안테나를 연결해주는 방법을 활용할 수 있다. 그림 17에서 보여지듯이, 일반적인 태양광 발전소 접속반에는 우리가 흔히 접하는 상용 전원 콘센트가 있으므로, PV-WiFi 모듈의 전원으로 쉽게 구할 수 있는 마이크로 USB 타입의 USB 어댑터를 사용하면 된다.

그림 18은 30kW 태양광 발전소 접속반에 적용된 PV-WiFi 모듈에 기반한 스트링 발전 무선 모니터링 셋팅 환경을 보여준다. 본 논문에서 실행한 테스트에

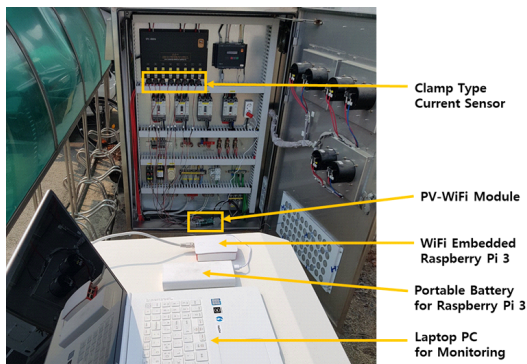


그림 18. 30kW 태양광 발전소 접속반에 적용된 PV-WiFi 모듈에 기반한 스트링 발전 무선 모니터링 셋팅 환경
Fig. 18. Setting environment of wireless string monitoring based on the PV-WiFi module applied to combiner box in 30kW PV plant.

서는 PV 스트링 데이터 수집 모듈로 WiFi 통신 기능을 내장하여 별도의 WiFi 통신 모듈이 필요없는 라즈베리파이 3을 활용하였다. 무선 통신의 장점인 휴대성과 이동성을 살리기 위하여, 라즈베리파이 3 전원으로 휴대용 배터리를 사용하였고 모니터링용 컴퓨터로 노트북 컴퓨터를 사용하였다. WiFi 무선통신으로 전송된 스트링별 전류 정보는 WiFi 통신 기능을 내장한 라즈베리파이3 장치를 통해 수신되고 사용자는 스트링별 발전 정보를 노트북 컴퓨터를 통해 모니터링할 수 있다.

본 논문에서는 PV 접속반으로부터의 거리 및 방향이 서로 다른 지점에서 PV 스트링 무선 모니터링을 수행한 결과를 제시한다. 그림 19는 PV 접속반으로부터 약 20m 떨어진 지점에서의 PV 스트링 무선 모니터링을 수행하는 모습을 보여준다. 그리고, 그림 21은, 그림 19에서의 방향과 거의 반대 방향으로, PV 접속반으로부터 약 50m 떨어진 지점에서의 PV 스트링 무선 모니터링을 수행하는 모습을 보여준다. 또한, 그림 20은 그림 19에서 보여지는 약 20m 떨어진 지점에서 수행한 PV 스트링 무선 모니터링 결과를, 그림 22은 그림 21에서 보여지는 약 50m 떨어진 지점에서 수행

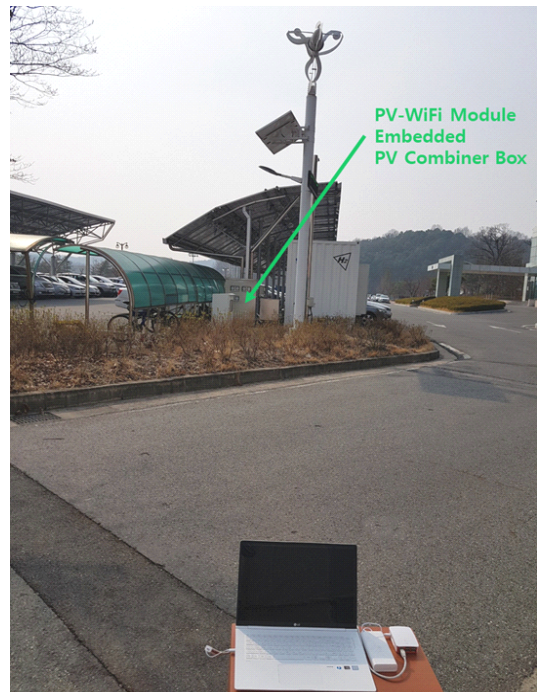


그림 19. PV 접속반으로부터 약 20m 떨어진 지점에서의 PV 스트링 무선 모니터링 수행 모습
Fig. 19. Performing wireless PV string monitoring at a point about 20m away from the combiner box.

```

pi@raspberrypi: ~/WiFi_Development/RaspberryPi
Current at string #5 through the Wi-Fi is 4.57 [A]
Current at string #6 through the Wi-Fi is 4.94 [A]
Current at string #7 through the Wi-Fi is 0.0 [A]
Current at string #8 through the Wi-Fi is 0.0 [A]

Transmission of 'Request' is done

----> Wi-Fi packet with receiving sequence (#50) : Response#5.28#4.67#4.20#5.21#4.4
Time on receiving is 2019-03-25T14:45:31.904
Current at string #1 through the Wi-Fi is 5.28 [A]
Current at string #2 through the Wi-Fi is 4.67 [A]
Current at string #3 through the Wi-Fi is 4.20 [A]
Current at string #4 through the Wi-Fi is 5.21 [A]
Current at string #5 through the Wi-Fi is 4.45 [A]
Current at string #6 through the Wi-Fi is 4.89 [A]
Current at string #7 through the Wi-Fi is 0.0 [A]
Current at string #8 through the Wi-Fi is 0.0 [A]

Transmission of 'Request' is done

----> Wi-Fi packet with receiving sequence (#51) : Response#5.13#4.60#4.46#5.8#4.44
Time on receiving is 2019-03-25T14:45:52.523
Current at string #1 through the Wi-Fi is 5.13 [A]
Current at string #2 through the Wi-Fi is 4.60 [A]
Current at string #3 through the Wi-Fi is 4.46 [A]
Current at string #4 through the Wi-Fi is 5.8 [A]
Current at string #5 through the Wi-Fi is 4.44 [A]
Current at string #6 through the Wi-Fi is 4.67 [A]
Current at string #7 through the Wi-Fi is 0.0 [A]
Current at string #8 through the Wi-Fi is 0.0 [A]

Transmission of 'Request' is done

----> Wi-Fi packet with receiving sequence (#52) : Response#5.12#4.47#4.65#5.1#4.21
Time on receiving is 2019-03-25T14:46:13.146
Current at string #1 through the Wi-Fi is 5.12 [A]
Current at string #2 through the Wi-Fi is 4.47 [A]
Current at string #3 through the Wi-Fi is 4.65 [A]
Current at string #4 through the Wi-Fi is 5.1 [A]
Current at string #5 through the Wi-Fi is 4.25 [A]
Current at string #6 through the Wi-Fi is 4.93 [A]
Current at string #7 through the Wi-Fi is 0.0 [A]
Current at string #8 through the Wi-Fi is 0.0 [A]
    
```

그림 20. PV 접속반으로부터 약 20m 떨어진 지점에서의 PV 스트링 무선 모니터링 결과
 Fig. 20. Results of wireless PV string monitoring at a point about 20m away from the combiner box.



그림 21. PV 접속반으로부터 약 50m 떨어진 지점에서의 PV 스트링 무선 모니터링 수행 모습
 Fig. 21. Performing wireless PV string monitoring at a point about 50m away from the combiner box.

```

pi@raspberrypi: ~/WiFi_Development/RaspberryPi
Current at string #5 through the Wi-Fi is 4.16 [A]
Current at string #6 through the Wi-Fi is 4.54 [A]
Current at string #7 through the Wi-Fi is 0.0 [A]
Current at string #8 through the Wi-Fi is 0.0 [A]

Transmission of 'Request' is done

----> Wi-Fi packet with receiving sequence (#77) : Response#4.70#4.11#4.1#4.80#4.12
Time on receiving is 2019-03-25T14:54:48.739
Current at string #1 through the Wi-Fi is 4.70 [A]
Current at string #2 through the Wi-Fi is 4.11 [A]
Current at string #3 through the Wi-Fi is 4.1 [A]
Current at string #4 through the Wi-Fi is 4.80 [A]
Current at string #5 through the Wi-Fi is 4.12 [A]
Current at string #6 through the Wi-Fi is 4.53 [A]
Current at string #7 through the Wi-Fi is 0.0 [A]
Current at string #8 through the Wi-Fi is 0.0 [A]

Transmission of 'Request' is done

----> Wi-Fi packet with receiving sequence (#78) : Response#5.0#4.26#4.13#4.87#4.22
Time on receiving is 2019-03-25T14:55:09.337
Current at string #1 through the Wi-Fi is 5.0 [A]
Current at string #2 through the Wi-Fi is 4.26 [A]
Current at string #3 through the Wi-Fi is 4.13 [A]
Current at string #4 through the Wi-Fi is 4.87 [A]
Current at string #5 through the Wi-Fi is 4.20 [A]
Current at string #6 through the Wi-Fi is 4.53 [A]
Current at string #7 through the Wi-Fi is 0.0 [A]
Current at string #8 through the Wi-Fi is 0.0 [A]

Transmission of 'Request' is done

----> Wi-Fi packet with receiving sequence (#79) : Response#5.1#4.37#4.13#4.75#4.25
Time on receiving is 2019-03-25T14:55:30.020
Current at string #1 through the Wi-Fi is 5.1 [A]
Current at string #2 through the Wi-Fi is 4.37 [A]
Current at string #3 through the Wi-Fi is 4.13 [A]
Current at string #4 through the Wi-Fi is 4.75 [A]
Current at string #5 through the Wi-Fi is 4.29 [A]
Current at string #6 through the Wi-Fi is 4.49 [A]
Current at string #7 through the Wi-Fi is 0.0 [A]
Current at string #8 through the Wi-Fi is 0.0 [A]
    
```

그림 22. PV 접속반으로부터 약 50m 떨어진 지점에서의 PV 스트링 무선 모니터링 결과
 Fig. 22. Results of wireless PV string monitoring at a point about 50m away from the combiner box.

한 PV 스트링 무선 모니터링 결과를 보여준다. 그림 20과 22에서 보여지듯이, PV 스트링 데이터 수집 모듈로써의 라즈베리파이 3은 PV-WiFi 모듈로 WiFi 통신을 통해 데이터 요청 패킷 'Request'를 전송한다. 데이터 요청 패킷을 수신한 PV-WiFi 모듈은 잡음 억제 전류값 계산을 통해 스트링별 전류 데이터 저장한다.

그림 19와 21에서 PV-WiFi 모듈에 저장된 스트링별 전류 데이터는 WiFi 통신을 통해 PV 스트링 데이터 수집 모듈인 라즈베리파이 3으로 전송한다. 그 후, 라즈베리파이 3은 수신된 PV 스트링 데이터를 노트북 PC로 전달하여 화면에 출력함으로써, 사용자는 태양광 발전 스트링 모니터링을 수행할 수 있다. 그림 19와 21에서 보여지는 PV 스트링 무선 모니터링을 수행할 당시, 접속반 내 부품 결손으로 7번과 8번의 스트링에서 발전을 하지 못하고 있었다. 이러한 이상 상태는 그림 20과 22의 모니터링 결과 화면에서 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 WiFi 통신에 기반한 태양광 발전 스트링 무선 모니터링을 위한 PV-WiFi 모듈의 구현 방법을 상세하게 기술하였고 실제 운용되는 태양광 발전소에 적용하여 테스트한 실험 결과를 제시하였다.

본 논문에서 구현된 PV-WiFi 모듈의 첫 번째 특징은 스마트기기, 컴퓨터 등 우리가 흔히 접하는 다양한 단말들에 기본적으로 내장된 WiFi 통신을 기반으로 하여 높은 사용자 친화성 및 휴대성을 갖는다. 두 번째 특징으로, 스트링 모니터링을 위해 클램프형 전류 센서를 사용하여 태양광 발전소 접속반 내 장치나 전선의 분해, 수정, 재조립을 필요로 하지 않고 편리하게 접속반 내에 부착할 수 있어 높은 적용 편리성을 가지면서도, 스트링 모니터링 장치가 없는 기존 레거시 태양광 발전 접속반에도 쉽게 적용 가능하다. PV-WiFi 모듈은 크게 ATmega328 MCU 처리부와 ESP8266 WiFi 처리부로 구성된다. ATmega328 MCU 처리부는 클램프형 전류 센서로부터 전달된 아날로그 센싱 신호를 입력받아 스트링에서의 실제 전류값을 forgetting-factor moving average 기반으로 잡음을 억제하면서 계산하고 저장한 후 UART 통신을 통해 ESP8266 WiFi 처리부로 전송한다. ESP8266 WiFi 처리부는 PV 스트링 데이터 수집 모듈과 WiFi 통신하여 데이터 요청 패킷을 수신하여 ATmega328 MCU 처리부로 전달하거나, ATmega328 처리부로부터 전달받은 스트링 데이터를 PV 스트링 데이터 수집 모듈로 전송한다. 본 논문에서 구현된 PV-WiFi 모듈에 기반한 PV 스트링 데이터 무선 모니터링은 실제 운용되는 30kW 태양광 발전소 내 접속반에 적용되어 테스트되었다. 테스트 결과, 스트링별 발전 정보를 높은 휴대성을 가지고 모니터링할 수 있음을 확인하였다. 또한, 접속반 내 부품 결손으로 인해 발전되지 않는 이상 스트링을 모니터링을 통해 찾아낼 수 있음도 확인하였다.

References

[1] Ministry of Trade, Industry and Energy, *Korea's 3020 Renewable Energy Initiative* (2017), Retrieved Sep. 10, 2020, from <https://www.gov.kr/portal/ntnadmNews/1279625>

[2] J.-Y. Choi, *Spain addressing climate change and environmental issues* (2019), Retrieved Sep. 10, 2020, from <http://www.opinionnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=24705>

[3] J.-D. Jeong and I.-W. Lee, "Module development for remotely monitoring photovoltaic information of solar power plant based on LoRa," *KICS Fall Conf. 2019*, pp. 99-100, Seoul, Korea, Nov. 2019.

[4] SMA Solar Technology AG, *Zone Monitoring vs. String Monitoring*, Retrieved Sep. 10, 2020, from https://www.sma-france.com/fileadmin/content/www.sma-france.com/Service/Documents/Livre_Blanc_zone_monitoring.pdf

[5] M. N. Akram and S. Lotfifard, "Modeling and health monitoring of DC side of photovoltaic array," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1245-1253, Oct. 2015.

[6] J.-D. Jeong and I.-W. Lee, "Implementation of wireless monitoring module of strings at PV combiner box based on WiFi communication," *IEIE Summer Conf. 2019*, pp. 1406-1408, Jeju Island, Korea, Jun. 2010.

[7] L. Gao, R. A. Dougal, S. Liu, and A. P. Iotova, "Parallel-connected solar PV system to address partial and rapidly fluctuating shadow conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1548-1556, May 2009.

정진두 (Jin-Doo Jeong)



1998년 8월 : 한양대학교 전자공학과 졸업
 2000년 8월 : 한양대학교 전자통신전파공학과 석사
 2017년 2월 : 한양대학교 전자통신전파공학과 박사
 2010년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원

<관심분야> 에너지ICT기술, 무선통신공학

[ORCID:0000-0002-8137-1502]

이 일 우 (Il-Woo Lee)



1992년 2월 : 경희대학교 컴퓨터
공학과 졸업

1994년 2월 : 경희대학교 컴퓨터
공학과 석사

2007년 2월 : 충남대학교 컴퓨터
공학과 박사

1994년 3월~현재 : 한국전자통
신연구원 책임연구원

2019년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 에너지·환경
ICT연구단 단장

2019년 1월~현재 : 한국통신학회 에너지 소사이어티
위원장

2019년 1월~현재 : 대한전기학회 전력정책연구회 위원

2018년 1월~현재 : 한국연구재단 에너지환경 전문위원
<관심분야> 에너지·환경ICT융합기술, 분산에너지 플
랫폼/스마트그리드