

분산형 태양광 발전 시스템을 위한 실시간 원격 모니터링 시스템 구현

김창준 · 김정기 · 장경식*

An Implementation of Realtime Remote-Monitoring System for Distributed Photovoltaic Power Plants

Chang-Joon Kim · Jung-Ki Kim · Kyung-Sik Jang*

School of Computer Science Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan 330-708, Korea

요 약

본 논문에서는 분산형 태양광 발전 시스템에 적용 가능한 실시간 원격 모니터링 시스템을 소개한다. 제안된 시스템은 상태정보 수집 장치인 PVC(Photo Voltaic Client), 모바일 애플리케이션인 UTC(User Terminal Client), 시스템 운영프로그램인 OTC(Operating Terminal Client), 그리고 통신서버와 데이터를 저장하는 서버로 구성되어 있으며, 상태정보 수집 장치는 인버터와 시리얼통신을 통하여 운영정보를 수집하고, 수집된 정보는 서버에 전송되어 데이터 서버에 저장된다. 저장된 정보는 모바일 애플리케이션을 통하여 모니터링 되고, 수집장치 및 사용자 등의 정보는 운영프로그램을 통하여 관리된다. 또한, 제안된 시스템은 사용자에게 실시간으로 발전량 및 고장진단에 관한 정보를 제공함으로써, 고장인지 향상 및 유지보수비용 감소의 가능성을 제시해 주었다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a real-time remote monitoring system for distributed solar power generation system. The proposed system consists of PVC, UTC, OTC and monitoring server. PVC collects the operational information from the PV's inverter via serial interface. The sensing data is transmitted to the server by wireless communications and stored in the DB server. The PV's status is monitored via UTC, and the operating of PVC and UTC are managed by OTC. In addition, by providing information about the power generated by PV system and failure diagnosis in real time, the proposed system shows the possibility of reducing the maintenance costs and improved failure recovery time.

키워드 : 태양광 발전, 실시간 모니터링, 고장진단

Key word : Solar Photovoltaic, Realtime Monitoring, Fault Diagnosis

Received 10 August 2015, Revised 05 September 2015, Accepted 18 September 2015

* Corresponding Author Kyung-Sik Jang(E-mail:ksjang@koreatech.ac.kr, Tel:+82-41-560-1352)

Computer Science Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan 330-708, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.10.2450>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

최근 국내외적으로 화석연료와 관련되어 지구온난화 및 자원고갈로 인하여 친환경 대체에너지에 대한 관심이 증가하고 있으며, 환경오염에 대한 우려가 없고, 설치가 용이한 태양광 발전 시스템의 설치가 지속적으로 증가하고 있는 실정이다[1]. 하지만, 태양광 발전 시스템 특성상 표면적으로 고장에 대한 진단이 쉽지 않기에 지속적인 성능 및 안전성 모니터링 시스템이 필수 불가결하다. 하지만, 일반적으로 대규모 태양광 발전 시스템 중심으로 모니터링 시스템 연구가 진행되고, 이에 반해 중소규모의 경우 지속적인 모니터링이 취약한 실정이다. 이는 사용자에게 고장에 대한 인지정보가 늦어짐에 따라 전체적인 발전량이 18%정도 감소되어진다고 한다[2]. 고장과 출력저하는 태양광 발전시스템의 발전량 감소의 직접적인 영향을 주게 되는데, 그 원인으로 PV 어레이 및 인버터 등의 시스템 결함과 조류의 분비물이나 먼지, 젖은 낙엽과 같은 오염물질이 쌓이거나 순간적인 구름 가림 현상, 기타 잠재적인 출력저하 요소 등으로 인하여 고장과 출력저하가 나타나게 된다. 하지만, 측정된 I-V 곡선 값을 분석하여 고장의 원인을 추측할 수 있고, 그에 따른 즉각적인 조치를 통하여 발전량 감소에 따른 손실을 예방할 수 있게 된다[3-8].

이에, 본 논문에서는 중소규모의 분산형 태양광 발전 시스템에 적용 가능한 모니터링 시스템을 설계 및 구현하여, 사용자로 하여금 실시간으로 발전량에 대한 정보 뿐만 아니라 고장에 대한 정보까지 제공해 줌으로써, 즉각적인 조치를 취하도록 편의성을 제공하고자 한다.

II. 태양광 발전 시스템

태양광 발전은 PN접합 구조를 가진 태양전지에 빛 에너지가 투입되어 전자의 이동으로 인해 전류가 흐르게 되어 빛을 전기에너지로 바꾸는 발전방식이다. 태양전지 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 에 0.6V의 전압이 발생되고, 최대 1.5W의 용량을 갖는다. 이때, 태양전지의 기본 소자를 셀이라고 하며, 셀의 직병렬조합이 태양전지 모듈이 되고, 이 모듈을 연결시켜 놓은 장치를 어레이라고 한다. 일반적인 태양광 발전 시스템은 그림1과 같이 태양전지 어레이, 직류전력 조절장치, 인버터, 축전지, 계통연계제어

장치로 구성되며, 국내의 경우 계통연계는 한전계통과 연결되며, 독립형의 경우 축전지가 포함될 수 있다. 또한, 풍력 발전시스템 등의 타 발전시스템과 복합형으로 연결되는 하이브리드형으로 구분 된다.

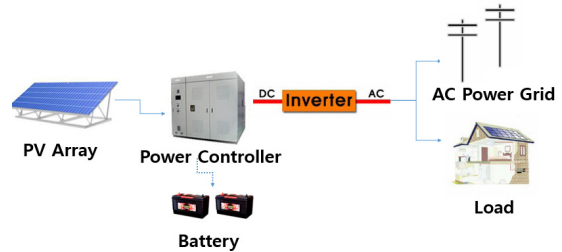


그림 1. 태양광 발전시스템 구조
Fig. 1 Structure of the PV generation system

태양전지 어레이는 입사된 태양 빛에너지를 직류 전력을 생성해 주는 기능을 하며, 직류전력 조절장치는 전력품질 및 보호 기능과 DC전력을 인버터로 전달하는 기능을 한다. 인버터는 발전한 직류를 교류로 변환하며, 변환된 전력은 부하장치나 별도의 축전지에 저장하거나 한전계통으로 공급된다. 이상 태양광 발전시스템의 정의는 태양전지를 이용하여 전력을 생산, 이용, 계측, 감시, 보호, 유지관리 등을 수행하기 위해 구성된 시스템이라고 할 수 있다.

III. 제안된 모니터링 시스템

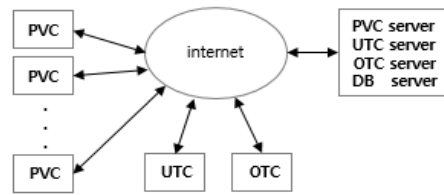


그림 2. 모니터링 시스템 구성도
Fig. 2 Monitoring System diagram

제안하는 모니터링 시스템은 일반적인 태양광 발전 시스템 구성에 추가적인 정보수집 시스템을 연결하여 실시간 모니터링 기능을 수행하는 시스템으로써, 구성은 그림 2와 같이 인버터와 연결하는 상태정보 수집 장

치(PVC), 수집정보를 송수신처리하고, 가공 및 저장하는 서버군, 저장된 정보를 조회 및 알림서비스를 제공해 주는 모바일 앱(UTC), 상태정보 수집 장치 및 사용자 정보 등 운영정보를 관리하는 운영프로그램(OTC)까지 총 4그룹으로 구성되어 있다.

3.1. PVC

PVC(PhotoVoltaic Client)는 상태정보 수집 장치를 말하며, 인버터와 시리얼케이블로 연결되어 태양전지 전압, 전류, 전력량 등 센싱 데이터를 수집하는 기능을 수행한다. 수집된 정보는 버퍼에 저장한 후 가공 및 압축하여 WiFi를 통하여 서버에 센싱 데이터를 전송하게 되며, 내부 구성은 그림 3과 같다.

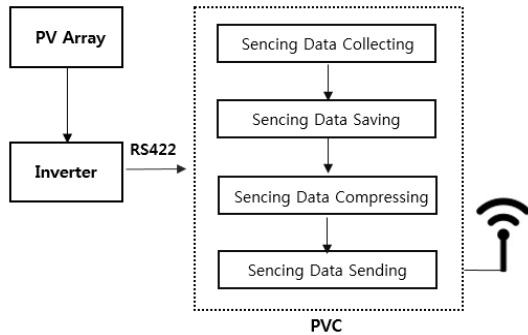


그림 3. PVC 구성도
Fig. 3 Structure of PVC

3.2. UTC

UTC(User Terminal Client)는 모바일 애플리케이션을 말하며, 총 4가지 모듈로 구성되어 있다. 인버터 등록 정보 및 현재 발전전력, 태양전지 전압, 전류, 발전효율 등의 상태를 실시간 모니터링 하며, 일/월/년 단위로 인버터 현재 전력량, 계통 전력, 계통 주파수, 인버터 역률, 인버터 적산 전력량의 통계정보를 제공하고, PVC 별로 수집되는 인버터 및 태양전지 관한 상태를 진단하는 기능을 수행한다.

3.3. OTC

OTC(Operating Terminal Client)는 PVC 등록 정보 및 UTC 사용자 정보 관련하여 등록, 변경, 삭제하는 기능과 PVC 데이터 센싱 주기 및 횟수를 설정하는 윈도우즈 기반 소프트웨어이다.

3.4. Server

서버구성은 초기 접속과 로드 밸런싱을 담당할 접속서버와 PVC 단말과 직접 데이터를 송수신하는 서비스 서버로 분리하여 구성하였고, 아래 그림 4와 같다.

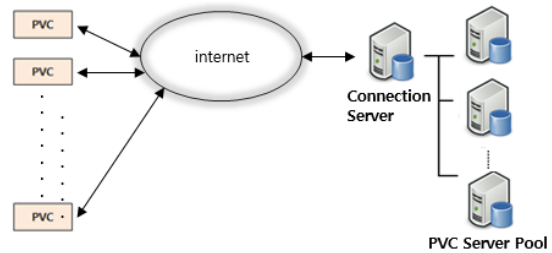


그림 4. PV 모니터링 서버 구성도
Fig. 4 PV Monitoring Server Configuration

접속서버는 PVC 단말들의 접속 창구 역할을 하며, 서비스 서버 풀에 속한 서버들의 상태들을 모니터링 하고, 단말과 서비스 서버 연결을 중재하는 역할을 한다. 또한, 접속서버는 서비스 서버들의 상태정보를 활용하여 전체 시스템이 최대 성능을 발휘할 수 있도록 서비스 서버들 사이의 로드 밸런싱(load balancing) 기능을 수행한다. 서비스 서버는 PVC 단말과 직접적으로 데이터를 송수신하는 서버로, 센싱 작업 요청을 하고, 그 결과를 받아서, 데이터 베이스에 저장하는 작업을 수행한다.

IV. 시스템 구현 및 성능평가

4.1. 구현

제안한 모니터링 시스템 검증하기 위하여 그림 5과 같이 프로토타입으로 구현하였으며, 3kw급 중소형 태양광 발전시스템을 반경 10km내에 분산시켜 총 3군데 설치하였고, 약 5개월간 모니터링을 진행하였다.

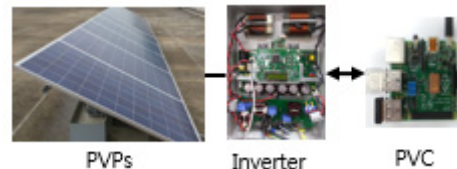


그림 5. 모니터링 시스템 프로토타입
Fig. 5 Prototype of Proposed Monitoring System

표 1은 태양광 인버터의 사양이며, 표 2와 3은 인버터와 연결된 PVC 와 서버의 사양이다.

표 1. 태양광 인버터 사양

Table. 1 Photovoltaic Inverter Specification

| Item | Specification |
|-----------------------------|---------------|
| PV power | 3kw |
| Max DC voltage | 600V |
| Max Input current | 17A |
| Nominal AC power | 3kw |
| Nominal AC voltage | 220V |
| Max output current | 14.5A |
| AC grid frequency | 60/59.3 Hz |
| Operating temperature range | -20℃ ~ 50℃ |

표 2. PVC 단말기 사양

Table. 2 PVC Device Specification

| Item | Specification |
|---------|----------------------------|
| OS | Linux(e.g. Raspbian) |
| CPU | 700MHz single core ARM1176 |
| Memory | 512MB |
| Storage | 4GB eMMC IC chip |
| Power | 3.5W |

표 3. 서버 사양

Table. 3 Server Specification

| Item | Specification |
|---------|-------------------------------|
| OS | Linux |
| CPU | Xeon Quad Core E5-2609 2.5GHz |
| Memory | 4GB PC3-10600E DDR3 |
| Storage | SATA 500GB |



그림 6. UTC 스냅샷
Fig. 6 UTC Snapshot

그림 6은 UTC 구현화면이며, PVC에서 수집된 정보를 기반으로 발전량, 효율 등의 조회 화면과 일, 월, 년 단위의 통계 화면, 알림서비스 등의 설정화면으로 구성

하여 실제 태양광 발전 상황을 실시간으로 모니터링 하도록 구현하였다.



그림 7. OTC 스냅샷
Fig. 7 OTC Snapshot

그림 7은 OTC 구현화면이며, 윈도우즈 기반으로 MFC를 이용하여 개발한 응용프로그램이다. PVC 작동 상태 실시간 조회 화면과 PVC 단말 정보 등록, 변경, 삭제 기능, UTC 사용자 등록, 변경, 삭제 기능 및 PVC 데이터 센싱 주기 및 횟수 등을 설정하는 기능이 실제 구현 완료하였다.

표 4. 태양광 발전 시스템 센싱 데이터

Table. 4 PV Sensing Data

| Item | size(byte) |
|----------------------------|------------|
| Solar Cell Voltage | 2 |
| Solar Cell Current | 2 |
| Solar Cell Current Power | 2 |
| Inverter Accumulated Power | 4 |
| Inverter Current Power | 2 |
| Inverter Max. Power | 2 |
| Inverter Power Factor | 2 |
| Inverter Daily Power | 2 |
| Utility Line Voltage | 2 |
| Utility Line Current | 2 |
| Utility Line Frequency | 2 |
| Inclined Surface Radiation | 2 |
| Horizontal Radiation | 2 |
| Outer Temperature | 2 |
| Module Temperature | 2 |

태양광 발전시스템이 설치된 3군데에서 표 4와 같은 센싱 데이터를 수집하였으며, 수집된 데이터 중 태양전지 전류 값을 다음과 같이 그래프로 표현하였다.

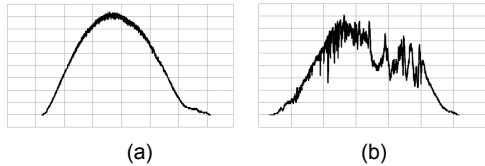


그림 8. 맑은 날과 흐린 날 그래프
Fig. 8 Sunny & Cloudy Day Graph

그림 8은 맑은 날과 흐린 날의 전류 세기를 측정한 그래프로이며, 맑은 날 a는 태양의 빛이 시간에 따라 전류의 세기가 강해짐을 알 수 있으며, 발전량에 비례하여 가장 이상적인 곡선을 나타내고 있다. 반면 흐린 날 b는 구름의 영향에 따라 전류의 세기가 요동치는 곡선을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. b의 경우 대체적으로 구름의 양이 적은 경우를 나타낸다.

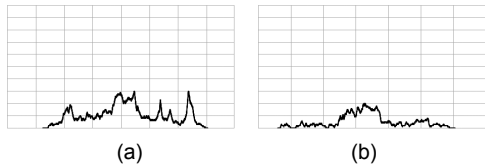


그림 9. 흐린 날과 비 오는 날 그래프
Fig. 9 Cloudy & Rainy Day Graph

그림 9는 흐린 날과 비 오는 날의 그래프이며, a의 경우 그림 8의 b와 비교하여 볼 때, 구름의 양이 많을 경우 전류의 세기가 급격히 떨어지고, 요동치는 그래프를 확인할 수 있으며, 그림 b의 경우는 비 오는 날의 그래프로서, 전류의 세기가 0에 가까운 그래프를 확인할 수 있다. 그림 10은 불규칙한 날씨에 대한 그래프를 나타내고 있다. Day 1은 구름이 많이 끼거나 비가 내린 후 구름의 영향으로 불규칙적으로 변화하는 그래프를 확인할 수 있으며, Day 2의 경우 Day 1과 상반되는 그래프로서, 맑은 날씨 후 갑작스레 비구름으로 인하여 전류 값이 감소되는 그래프를 나타내고 있다. Day 3의 경우 흐린 날씨 후 비구름으로 인하여 중간에 지속적으로 전류 세기가 감소되다가 후반부에 비가 그침을 알 수 있는 그래프를 나타내고 있다.

그림 11에서는 태양광발전 시스템을 설치한 3군데 사이트를 비교하여 예상과 달리 비정상적인 그래프를 확인하여 고장진단을 예측할 수 있다. Day 1의 그래프에서는 사이트 1, 3은 앞선 확인 한 바와 같이 맑은 날씨에 나타나는 이상적인 그래프와 달리 전류 값이 불안정한 곡선을 나타내고 있으며, 이는 태양전지 모듈의 기기적인 결함을 추측해 볼 수 있다. Day 2의 그래프에서는 사이트 1의 표시된 시점에서 전류 값이 발생하지 않음을 알 수 있고, 이는 인버터 고장 및 네트워크 단절 등의 고장으로 추측해 볼 수 있다.

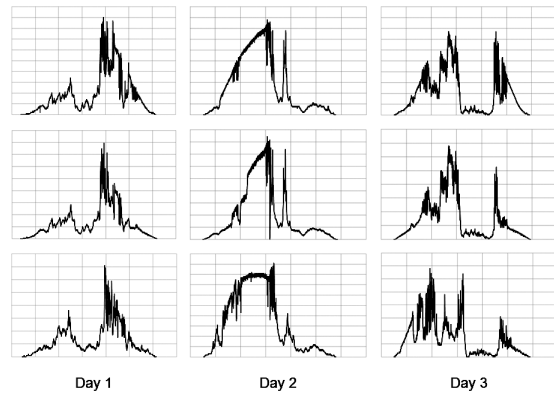


그림 10. 불규칙 날씨 그래프
Fig. 10 Irregular Weather Graph

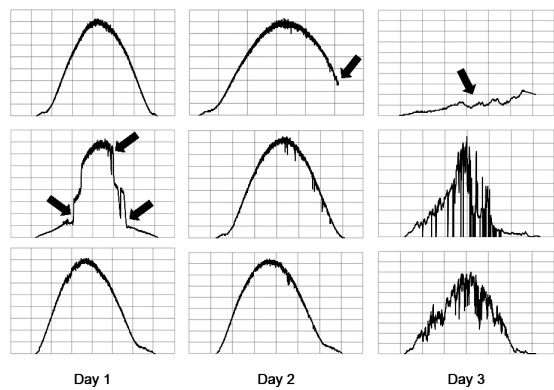


그림 11. 비정상적인 출력상태 그래프
Fig. 11 Abnormal Output State Graph

Day 3의 그래프에서는 사이트 2, 3의 그래프가 일정한 패턴으로 나타나지만, 사이트 1에서는 전류 값이 거의 발생하지 않고 있음을 알 수 있다. 이는 동일 지역 내

에 시설이 위치하고 있기 때문에 날씨의 영향으로 결론 내리기에는 힘든 상황이며, 전기적, 기계적 셀의 파손 또는 새의 배설물, 기타 오염물질로 인한 영향을 받았거나, 경년 열화에 의한 셀 및 리본의 노화, 기타 주변 환경에 의한 부식으로 추측할 수 있다[4].

4.2. 서버 성능 검증

제안하는 PV 모니터링 시스템에 대한 지속적이고, 안정적인 운영을 위해 동시접속수와 실시간성에 대하여 성능분석을 실시하였다. 먼저 동시 접속 수 평가 방법은 PC 1대당 30개의 PVC 단말기 시뮬레이터 프로그램을 실행시키고, 모두 7 대의 PC를 서버에 동시 접속하여, 전체 208개의 단말기 시뮬레이터가 동시에 서버에 접속하는 환경을 구성한 후, 서버의 CPU 부하와 메모리 사용량을 모니터링 실시하였다. 단말기 시뮬레이터가 모두 서버에 접속 한 후 모니터링 서버에서 시스템의 리소스 사용량을 확인한 결과, 프로세스들의 CPU 사용량이 47.2% 임을 확인하였고, 서버의 CPU 부하와 메모리 사용량이 지속적으로 50% 이하의 안정적인 상태를 유지하고 있음을 확인하였다. 두 번째, 서버에 접속하는 단말은 PVC, UTC, OTC로 구분 할 수 있으며, 이 중 서버와의 데이터 교환이 가장 빈번하게 발생하는 PVC 단말기에 대한, 실시간성을 분석하였다. 실시간성에 영향을 주는 요소는 PVC의 처리 지연, 네트워크 지연, 서버의 처리 지연 등을 들 수 있으며, PVC와 서버와의 응답 지연 시간의 합으로 평가 할 수 있다.

$$T_r = T_c + T_n + T_s \quad (1)$$

T_c 는 단말 처리 지연시간으로, PVC 플랫폼 운영에 필요한 운영체제가 실행하는 백그라운드 프로세스에 의한 CPU 부하량과 메모리 사용량에 PVC 프로그램에 의해 사용되는 부하 량과 메모리 량이 추가된다. T_n 은 네트워크 지연으로 각 PVC가 접속하는 네트워크 인프라의 상황에 따라 지연시간이 가변적이다. T_s 는 서버 처리 지연으로 서버의 백그라운드 프로세스뿐만 아니라, 서버에 접속된 PVC의 수에 따라 달라진다. 모니터링의 실시간 처리성능 T_r 값은 위의 3가지 항목들의 합과 같으며 다음과 같이 확인 되었다.

T_c 는 PVC 플랫폼에서 PVC 프로그램을 실행했을

경우, CPU 부하는 5% 미만으로 유지되고 있으며, PVC 처리 지연시간은 2ms 이하로 유지되고 있음을 확인하였고, T_n 은 평균적으로 10ms 이내임을 확인하였다. T_s 는 그림 14에서와 같이 PVC 수에 따른 서버의 평균 응답시간을 보여주고 있으며, 최초 30대를 연결한 경우부터 순차적으로 30 대씩 증가시켜가며, 평균 서버 응답시간은 최대 208대가 연결된 경우, 12.15ms 가 소요됨을 확인하였다. 따라서, PVC와 모니터링 서버간의 응답시간인 T_r 은 27.12ms 이내 임을 확인하게 되었다.

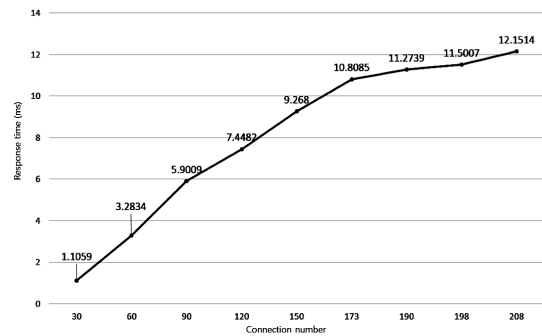


그림 12. 평균 응답시간
Fig. 12 Average Response Time

V. 결론

본 논문에서는 분산된 중소규모의 태양광 발전시스템의 인버터의 정보를 수집하여 실시간으로 원격 모니터링이 가능한 통합 모니터링 시스템을 구현하였다. 제안한 시스템을 통해 실시간으로 사용자에게 발전량 정보를 제공해 주고, 고장으로 예상되는 정보를 사전에 알려줌으로써, 고장 인지 속도를 향상 시키고 유지보수 비용을 절감하는 효과를 기대 할 수 있다. 또한, 성능평가를 통하여, 제안된 시스템의 지속적이고, 안정적인 운영을 검증하였으나, 추후, 서버 응답 패킷의 일시적 폭증으로 인한 순간적인 트래픽 집중 또는 증가 상황이 예상되어 지속적인 서버 최저고하 작업이 필요할 것으로 예상된다. 또한, 수집된 데이터를 토대로 ESS와 연계한 스마트 그리드에 적용하는 방안에 대한 향후 추가적인 연구를 진행하고자 한다.

REFERENCES

- [1] EPIA, "Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017," European Photovoltaic Industry Association, Brussels 2013.
- [2] S. K. Firth, K. J. Lomas, and S. J. Rees, "A simple model of PV system performance and its use in fault detection," *Solar Energy*, vol. 84, pp.624-635, 2010.
- [3] E. L. Meyer and E. E. van Dyk, "Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 53, pp. 83-92, Mar 2004.
- [4] S. Pingel, O. Frank, M. Winkler, S. Daryan, T. Geipel, H. Hoehne, et al., "Potential induced degradation of solar cells and panels," in *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Honolulu, Hawaii, 2010, pp. 002817-002822.
- [5] A. J. Aristizabal, C. A. Arredondo, J. Hernandez, and G. Gordillo, "Development of Equipment for Monitoring PV Power Plants, using Virtual Instrumentation," in *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, 2006, pp. 2367-2370.
- [6] D. Sera, S. Spataru, L. Mathe, T. Kerekes, and R. Teodorescu, "Sensorless PV Array Diagnostic Method for Residential PV Systems," presented at *the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Hamburg, Germany, 2011.
- [7] S. Spataru, D. Sera, T. Kerekes, and R. Teodorescu, "Detection of increased series losses in PV arrays using Fuzzy Inference Systems," presented at *the Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE*, Austin, Texas, 2012.
- [8] A. Chouder and S. Silvestre, "Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 1929-1937, 2010.



김창준(Chang-Joon Kim)

2006 숭실사이버대학교 컴퓨터공학부 학사
2009 한국기술교육대학교 전기전자공학과 석사
2009 ~ 한국기술교육대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사과정
현재 : (주) 제이케이코어 대표
※관심분야 : Embedded System, Sensor Network



김정기(Jung-Ki Kim)

2014 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부 학사
2014 ~ 한국기술교육대학교 대학원 컴퓨터공학과 석사과정
※관심분야 : Embedded System, Sensor Network



장경식(Kyung-Sik Jang)

1987 고려대학교 공학사
1989 KAIST 전기전자공학과 석사
1998 Tokyo Institute of Technology 전기전자공학 박사
1999 ~ 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부 교수
※관심분야 : Embedded System, Sensor Network, Vision Sensor