

태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치의 운용특성에 관한 연구

박동명*, 김윤호*, 송두리*, 원종홍*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:pdos@chol.com

A Study on the Operation Characteristics of Energy Harvesting Device for PV Array

Dong-Myoung Park*, Yun-Ho Kim*, Du-Ri Song*, Jong-Heung Won*, Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education

요약

최근, 정부의 석탄발전소 감축 및 탄소 중립 정책에 따라 전력수급 문제를 해결하기 위하여, 그린 에너지원으로서의 전 환경책이 지속적으로 추진되고 있어, 태양광전원의 설치가 급증하고 있다. 이에 따라, 태양광 전원을 설치하는 경우 주변의 일조량 및 운용 환경을 고려하고 있지만, 주변 및 운용 환경의 변화로 특정 시간대에 음영이 발생할 수 있다. 이러한 조건으로 인하여, 인버터 운전 개시 전압보다 태양광 어레이의 전압이 낮으면 인버터는 대기 모드로 전환되며, 대기 모드 시간 동안 생산되는 전력은 개방 전압으로 손실된다. 따라서, 본 논문에서는 인버터의 대기 모드에서 잉여 전력을 배터리에 저장할 수 있는 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치를 제안하고, 이를 운용할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 상기에서 제시한 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 데이터 로거와 PLC 등과 같은 별도의 장치를 추가하지 않고, 태양광 인버터의 기존 장치를 사용하여 인버터 대기 모드에서 손실되는 전력을 배터리에 효과적으로 저장할 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 정부의 석탄발전소 감축 및 탄소 중립 정책에 따라 전력수급 문제를 해결하고자 그린 에너지원으로서의 전환정책이 지속적으로 추진되고 있다. 이에 따라 태양광 모듈 설치 시 일조량 및 운용 환경을 고려하여 설치하고 있지만, 식물의 변화 및 환경의 변화로 특정 시간대 음영이 발생할 수 있다. 이러한 음영으로 인하여 인버터 운전 시작 전압보다 어레이 전압이 낮을 경우, 태양광 인버터는 발전을 정지하고 대기 모드를 유지하며, 운전 시작 전압을 만족하면 정상운전을 재개한다. 따라서 3.5kW 태양광 인버터의 운전개시 전압인 200 [V_{dc}]를 기준으로, 250W급 태양광 모듈은 STC(standard test condition) 조건에서 4장 이상이 필요하고, NMOP(nominal module operating temperature) 조건에서 5장 이상이어야 함을 알 수 있다.

이것은 태양광 인버터의 운전 시작 전압보다 낮을 경우 태양광 모듈은 개방 모드로 전환되고, 인버터는 대기모드로 전환되어 에너지 손실이 발생한다. 상기의 문제를 해결하기 위

하여 다양한 연구가 진행되고 있으며, 그 중 회로변경 및 배터리 연계로 에너지 손실을 최소화 하는 장치가 개발되었다 [1]. 그러나, 회로변경을 위하여 데이터로거, PLC, 릴레이등의 계측 및 제어장치가 필요하고, 이러한 장치는 선로의 저항을 증가시켜, 발전량 손실을 야기하고 있는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 인버터의 대기 모드에서 잉여 전력을 배터리에 저장할 수 있는 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치를 제안하고, 이를 운용할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 상기에서 제시한 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 데이터 로거와 PLC 등과 같은 별도의 장치를 추가하지 않고, 태양광 인버터의 기존 장치를 사용하여 인버터 대기 모드에서 손실되는 전력을 배터리에 효과적으로 저장할 수 있음을 알 수 있다.

2. 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치의 구성

2.1 제어부 구성

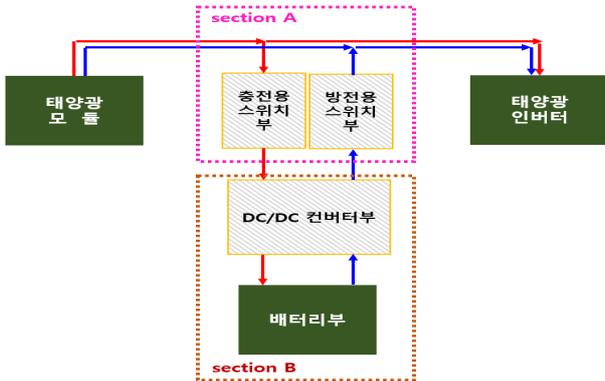
에너지 하베스팅 장치를 운용하기 위한 제어부는 설정 정보와 통신 정보, 제어 정보로 구성된다. 여기서, 설정 정보는 태양광 인버터의 운전 시작 전압과 배터리의 최대 전압, 최소 전압을 입력한다. 또한, 통신 정보는 그림 1과 같이 태양광 인버터의 입력 전압과 출력 전류의 정보를 수신하고, 제어기는 EMS(energy management system)와 modbus로 통신한다. 한편, 제어 정보는 배터리의 전압을 측정하고, 충전 및 방전용 스위치부의 동작 상태를 감시한다. 즉, 태양광 인버터의 전압이 인버터의 운전 시작 전압보다 낮을 경우, 배터리의 전압 상태가 양호하고, 배터리 전압에 의하여 운전 시작 전압보다 높으면 방전용 스위치부를 동작하며, 배터리의 용량이 부족한 경우 충전용 스위치부를 동작한다. 또한, 충전 중 출력 전류가 0이 아니면 충전용 스위치부를 정지한다.



[그림 1] 제어부의 구성

2.2 충전 및 방전용 스위치부 구성

충전 및 방전용 스위치부는 그림 2의 section A와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 충전용 스위치부는 태양광 모듈과 병렬로 연결하여 배터리를 충전하는데, 태양광 인버터의 출력이 0이면 배터리에 충전하고, 출력이 0이 아니면 충전용 스위치부가 정지하여 배터리 충전을 종료한다. 따라서, 충전용 스위치의 개/폐 동작에서도 태양광 인버터의 입력전압의 변동이 없어, 대기 모드로 전환되지 않는다. 한편, 방전용 스위치부는 태양광 모듈과 직렬로 연결하여 배터리를 방전하는 역할을 수행한다.



[그림 2] 충·방전 스위치부 및 DC/DC 컨버터부의 구성

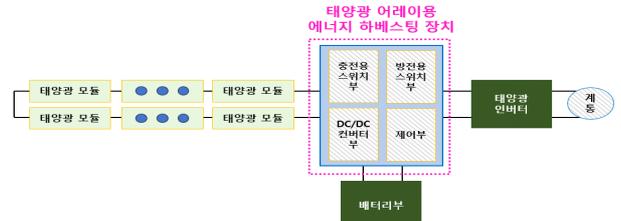
2.3 DC/DC 컨버터부 및 배터리부 구성

DC/DC 컨버터부와 배터리부는 그림 2의 section B와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, DC/DC 컨버터부의 충전용 전압은

$30\sim 100[V_{dc}]$ 의 범위를 가지고, 방전부 전압은 태양광모듈의 최대 동작전압 범위인 $30\sim 38[V_{dc}]$ 이다. 한편, 배터리부의 전압 범위는 $14\sim 57[V_{dc}]$ 로 연속전지의 1개의 모듈을 충전 할 수 있도록 구성한다. 여기서, 태양광모듈의 최대 동작전압 범위를 고려하여, 1개의 모듈은 $12[V_{dc}]$ 연속전지 4개를 직렬로 연결한다.

2.4 전체 시스템 구성

태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치는 그림 3과 같다. 이 장치는 제어부, 충전 및 방전용 스위치부, DC/DC 컨버터부로 구성된다.



[그림 3] 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치의 구성

3. 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치의 운용 알고리즘

태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치의 운용 알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 태양광 인버터의 운전 시작 전압(SR_{SV}), 배터리 최대 전압(ESS_{Vmax}), 배터리 최소 전압(ESS_{Vmin})을 입력한다.

[Step 2] 태양광 인버터의 입력 전압(SI_{Vdc})와 출력 전류(SI_{Aac})를 수신하고, 배터리의 전압(ESS_V)를 측정한다.

[Step 3] 태양광 인버터의 출력 전류(SI_{Aac})가 0 이면 [Step 4]로 이동하고, 아니면 [Step 6]로 이동한다.

[Step 4] 입력 전류(SI_{Vdc})와 배터리 전압(ESS_V)를 더한 값이 운전 시작 전압(SR_{SV})보다 크거나 배터리 전압(ESS_V)가 배터리 최소 전압(ESS_{Vmin})보다 크면, 충전용 스위치 개방 및 방전용 스위치 투입 후 [Step 7]로 이동하고, 아니면 [Step 5]로 이동한다.

[Step 5] 배터리 전압(ESS_V)가 배터리 최대 전압

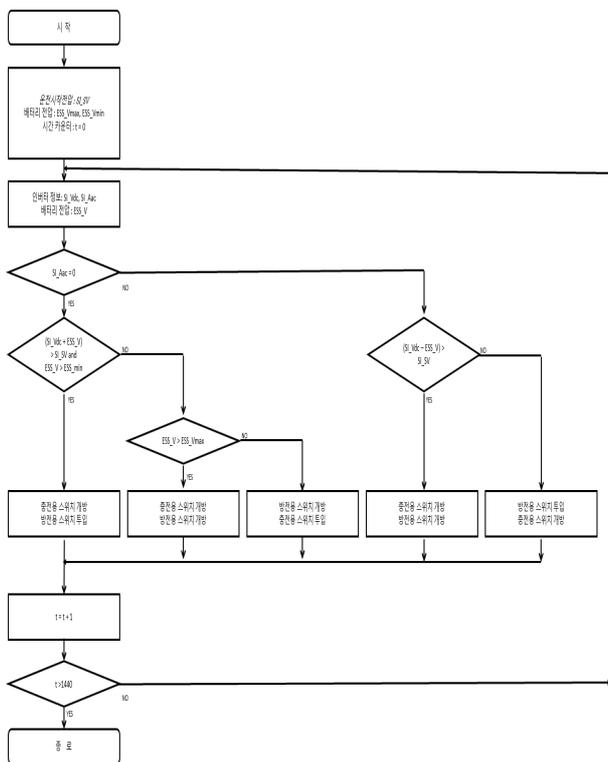
(ESS_{Vmax})보다 크면, 충전용 스위치 및 방전용 스위치를 개방하고, 아니면 방전용 스위치 개방 및 충전용 스위치 투입 후 [Step 7]로 이동한다.

[Step 6] 태양광 인버터 입력 전압(SI_{Vdc})에서 배터리 전압(ESS_V)를 뺀 값이 운전 시작 전압(SR_{SV})보다 크면, 충전용 스위치 개방 및 방전용 스위치 개방하고, 아니면 방전용 스위치 투입 및 충전용 스위치 개방한 후 [Step 7]로 이동한다.

[Step 7] 시간 카운터를 증가시키고, 시간 카운터가 max 보다 작으면 [Step 2]로 돌아가 반복하고, max보다 크면 종료한다.

[Step 8] 시간 카운터를 증가시키고, 시간 카운터가 max 보다 작으면 [Step 2]로 돌아가 반복하고, 아니면 종료한다.

상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 4] 에너지 하베스팅 장치의 운용 알고리즘

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

본 논문에서 제안한 에너지 하베스팅 장치는 표 1과 같은 사양의 태양광 모듈 8장과 연결하고, 표 2과 같은 사양의 태

양광 인버터에 연계하여 시험을 수행한다. 또한, 시험 방법은 정상상태에서 태양광 모듈에 인위적인 음영을 발생시키고, 배터리의 전압이 배터리 연계 조건 미만에서 충전 스위치부의 동작 상태를 측정하며, 인위적인 음영을 제거한 후 정상상태 복귀한다. 이때, 태양광 인버터의 입력 정보(V_{dc} , A_{dc})와 출력 정보(V_{ac} , I_{ac} , W_{ac}), 배터리의 단자 전압(ESS_V)을 측정하여 분석한다.

[표 1] 250W 태양광 모듈의 전기적 특성

구 분	특 성
정 격 용 량	250W
최 대 전 압 (V_{mp})	30.8V
최 대 전 류 (I_{mp})	8.14A
단 락 전 류 (I_{sc})	8.67A
개 방 전 압 (V_{oc})	37.5V
효 율	15.03%
온도에 따른 전기적 특성	-0.429%/°C

[표 2] 3.5kW 태양광 인버터의 전기적 특성

구 분	특 성
전 압 범 위	100~500V
운전 시작 전압	200V
정 격 전 압	350V

4.2 에너지 하베스팅 장치의 운용특성

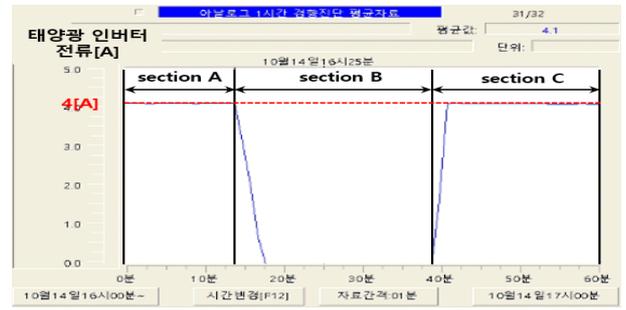
상기의 시험 조건을 바탕으로 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치의 운용특성을 나타내면 그림 5와 같다. 그림 5의 (a)는 에너지 하베스팅 장치와 EMS간 운용 화면을 나타낸다. 여기서, EMS와 연계시 제어권은 제어부가 아닌 운영자의 지령에 의하여 동작하며, EMS와 미 연계시 제어부가 활성화하여 에너지 하베스팅 장치를 운용한다. 또한, 그림 5의 (b)는 인버터에 공급되는 태양광 어레이 전압특성으로, section A는 에너지 하베스팅 장치와 연계된 상태에서 인버터 동작전압인 $200[V_{dc}]$ 이상으로 계통 연계구간이고, section B는 태양광 모듈에 음영이 발생하여 $100[V_{dc}]$ 이하로 유지되는 구간이며, section C는 음영이 해소되어 계통 연계 회복 상태를 나타낸다.

그리고, 그림 5의 (c)는 계통측 전류특성으로, 제어부에서 운용 알고리즘을 수행하기 위한 기준 전류로 사용한다. 여기서, section A는 에너지 하베스팅 장치와 태양광 모듈을 연결하는 과정에서 $1[I_{ac}]$ 로 계통 연계 중, 어레이 조정을 통하여

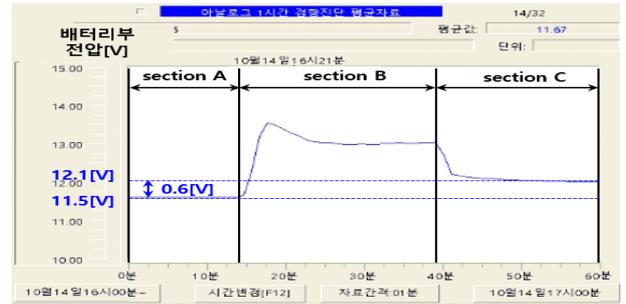
4[A_{ac}]까지 상승하는 정상 상태이고, section B는 그림 5의 (b)와 같이 운전 전압 미만인 대기모드로 계통측 전류가 0 [A_{ac}]인 구간이며, section C는 태양광 인버터의 운전 시작 전압이 충족되어 계통측 전류가 4[A_{ac}]로 회복된 구간을 나타낸다.

한편, 그림 5의 (d)는 배터리 단자측 전압특성으로, 충/방전 조건으로 사용한다. 여기서, section A는 계통연계 정상 상태에서 배터리 단자의 개방전압이고, section B는 그림 5의 (c)와 같이 계통측 전류가 0[A_{ac}]임으로, 정상 발전 모듈의 에너지를 저장하는 구간으로, 단자 전압이 상승하고 있으며, section C는 그림 5의 (c)와 같이 계통측 전류가 0[A_{ac}] 이상임으로 배터리 충전이 종료된 구간이다.

즉, section B와 같이 태양광 어레이의 전압이 인버터의 운전 시작 전압보다 낮을 경우, 계통측 전류는 0[A_{ac}]로 태양광 어레이의 에너지가 손실되지만, 에너지 하베스팅 장치를 운용하여 손실 에너지를 배터리에 저장할 수 있음을 확인하였다. 또한, 운용 실시간 데이터는 태양광 인버터에서 제공되는 기본 전력 정보를 사용함으로써 별도의 데이터 로거 없이 운용이 가능함을 확인하였다.



(c) 태양광 인버터의 전류특성



(d) 배터리부의 전압특성

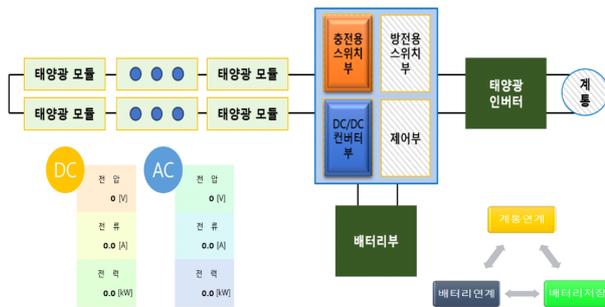
[그림 5] 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치의 운용특성

5. 결 론

본 논문에서는 인버터의 대기 모드에서 잉여 전력을 배터리에 저장할 수 있는 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치를 제안하고, 이를 운용할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 상기에 제시한 태양광 어레이용 에너지 하베스팅 장치를 바탕으로 시험을 수행한 결과, 데이터 로거와 PLC 등과 같은 별도의 장치를 추가하지 않고, 태양광 인버터의 기존 장치를 사용하여 인버터 대기 모드에서 손실되는 전력을 배터리에 효과적으로 저장할 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 박동명, “태양광 회로구성 및 리튬이온 전지를 이용한 태양광전원 효율향상장치 개발”, 중소기업기술혁신개발사업, 2020.07.15. ~ 2022.07.16.
- [2] 박동명, “회로 변경 및 배터리를 이용한 태양광 전원용 에너지 하베스팅 장치의 설계에 관한 연구”, 2024년도 한국산학기술학회 춘계학술대회, pp. 1-3, 2024.05.



(a) 에너지 하베스팅 장치의 운용 화면



(b) 태양광 인버터의 전압특성