

3.5kW급 태양광 스트링용 다기능 접속장치의 운용 알고리즘에 관한 연구

박동명*, 장형안*, 왕종용*, 강동구*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:pdos@chol.com

A Study on Operation Algorithm of Multi-functional Connection Device for 3.5kW PV Strings

Dong-Myoung Park*, Hyeong-An Jang*, Jong-Yong Wang*,

Dong-Gu Kang*, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약

태양광 스트링은 장기 운용 시 열화에 따른 성능 저하에 의해, 셀의 핫스팟 현상, 스트링 내 모듈 간 불일치 등의 이상 현상이 발생할 수 있다. 이러한 이상 현상은 인버터의 입력전압을 MPPT 동작범위 내에서 초과시켜, 태양광 스트링의 에너지를 생산할 수 없게 된다. 따라서, 본 논문에서는 이상 현상이 발생한 태양광 스트링의 에너지를 생산하기 위하여, 인버터의 정지 시에 태양광 스트링의 에너지를 배터리에 저장하는 3.5kW급 태양광 스트링용 다기능 접속장치의 운용 알고리즘을 제안한다. 여기서, 다기능 접속장치는 태양광 스트링의 출력전압이 인버터의 입력전압 미만이면 배터리의 충전 동작을 수행하고, 인버터의 MPPT 동작이 복구되면 배터리에 저장된 에너지를 방전한다. 상기의 내용을 바탕으로 다기능 접속장치의 운용 특성을 평가한 결과, 이상 현상이 발생한 태양광 스트링의 에너지를 배터리에 저장하고, 인버터의 정상운전 시 방전하여, 본 논문에서 제안한 운용 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

1. 서 론

신재생에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 제12조 제2항 및 동법 시행령 제15조 제1항 제1호에 의거하여, 태양광 발전 시스템의 의무대상과 비율이 확대되었다. 이러한 태양광 모듈은 일반적으로 STC(standard test condition) 및 NMOT(nominal module operating temperature)를 기준으로 성능이 평가되나, 실제 운용 환경에서는 기상 변화와 국부적 저해 요인으로 인해 비선형적인 출력 특성을 나타낸다[1]. 특히, 건물이나 수목에 의한 부분 음영(partial shading)은 셀 내 역바이어스 전압을 형성시켜 핫스팟(hot spot) 현상을 유발하며, 이는 스트링 출력 전압의 불균형과 시스템 전체의 효율 감소로 이어진다[2][3]. 또한, 노후 및 파손 모듈을 신규 모듈과 혼합하여 부분 교체하거나 재설치할 경우, 전기적 특성 차이에 의한 mismatch 손실(mismatching loss)이 더욱 심화되는 문제가 발생한다. 이는, 개별 모듈 출력의 단순 합산보다 실제 전력이 낮아지는 불균형을 발생시키며, 인버터의 최소 MPPT(maximum power point tracking) 동작 범위를 이탈하게 하여 가동 중단이나 추가적인 효율 저하를 야기할 수 있다[4].

따라서, 본 논문에서는 이상 현상이 발생한 태양광 스트링의 에너지를 생산하기 위하여, 인버터의 정지 시에 태양광 스트링의 에너지를 배터리에 저장하는 3.5kW급 태양광 스트링용 다기능 접속장치의 운용 알고리즘을 제안한다. 여기서, 다기능 접속장치는 태양광 스트링의 출력전압이 인버터의 입력전압 미만이면 배터리의 충전 동작을 수행하고, 인버터의 MPPT 동작이 복구되면 배터리에 저장된 에너지를 방전한다. 상기의 내용을 바탕으로 다기능 접속장치의 운용 특성을 평가한 결과, 이상 현상이 발생한 태양광 스트링의 에너지를 배터리에 저장하고, 인버터의 정상운전 시 방전하여, 본 논문에서 제안한 운용 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

2. 태양광 발전 시스템의 운용 특성

2.1 태양광 발전 시스템의 비선형적 출력 특성

일반적으로 태양광 모듈의 출력 특성은 STC와 NMOT 등에 의하여 결정된다. 여기서, STC는 일사량 1,000 [W/m²], 셀 온도 25 [°C], 대기질량 1.5인 조건으로 IEC 61215-1에서 규정하고 있으나, 실제 성능 평가 시에는 일사량 800 [W/m²], 셀 온도 20 [°C], 대기질량 1.5, 풍속 1 [m/s] 조건인 NMOT를 주로 적용한

다. 또한, 태양광 발전 시스템은 외부 환경에 따른 비선형적인 출력 특성으로 인해, 미스매칭 손실, 부분 음영에 의한 핫스팟, 부분 교체에 따른 불일치 현상 등이 발생한다.

2.2 미스매칭 손실

태양광 어레이는 다수의 모듈이 직·병렬로 연결되는데, 여기서 각 모듈의 전기적 특성이 일치하지 않을 경우 미스매칭 손실이 발생한다. 구체적으로, 어레이 내에 일사량 저하 및 공정 오차로 전류 특성이 낮은 모듈이 포함될 경우, 키르히호프의 전류 법칙에 의해, 전체 회로의 전류가 저출력 모듈의 전류 값으로 제한되는 병목 현상이 발생한다. 또한, 개별 모듈의 최대 전력 지점이 서로 다를 경우, 인버터의 MPPT 제어는 어레이 전체의 평균 지점을 추종하게 된다. 즉, 태양광 모듈의 전기적 특성의 불일치는 개별 모듈의 최적 출력을 이끌어내지 못하고, 전력 불균형에 따른 손실을 발생시킬 수 있다.

2.3 부분 음영에 따른 핫스팟 현상

건물, 수목 및 오염물질에 의한 부분 음영은 모듈의 물리적 손상을 야기하는 핫스팟 현상의 근본적인 원인으로 작용한다. 구체적으로, 이상현상이 발생한 셀은 전류를 생성하지 못하고 높은 저항체로 작용하여, 인접한 정상 셀들의 출력 전류를 통해 강한 역바이어스 전압이 형성된다. 또한, 역바이어스 상태의 셀은 급격한 고열을 발생시키는데, 이를 핫스팟이라 하며, 봉지재 열화, 셀의 영구 파손 및 화재 위험을 유발한다. 이를 해결하기 위하여, 바이패스 다이오드를 적용할 수 있으나, 전압 강하로 인해 시스템 전체의 발전 효율 급락한다는 한계점을 피할 수 없는 실정이다.

2.4 태양광 모듈의 부분 교체

태양광 발전 시스템은 파손 및 노후화된 모듈을 부분적으로 교체 및 재설치함에 따라, 기존 모듈과 신규 모듈의 혼합으로 인한 계통 부정합 문제가 발생할 수 있다. 구체적으로, 태양광 셀은 노후로 인한 불안정한 출력과 미스매칭 손실에 의해 열화되어, 매년 일정 비율로 출력이 감쇄된다. 이러한 노후 모듈은 신규 모듈과 동일한 스트링에 연결될 경우, 내부 저항의 증가와 단락전류의 감소를 발생시킬 수 있다. 즉, 신규 모듈과 노후 모듈이 혼합된 스트링에서 MPPT 제어를 수행할 경우, 동작점은 상대적으로 낮은 출력을 가진 노후 모듈의 I-V 곡선에 종속되어 시스템의 전체 효율이 비선형적으로 감소하게 된다. 따라서, 신규 모듈의 재설치에 앞서 기존 모듈의 잔존 성능을 평가하고, 유사한 성능의 모듈끼리 재배치하는 binning 전략이 필수적이다.

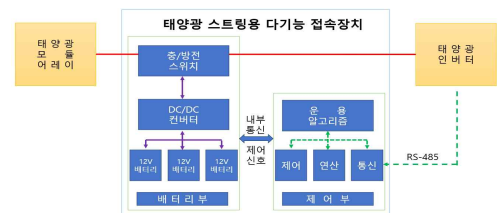
한편, 노후 모듈을 유지한 채 인버터만 신규 사양으로 교체하거나 시스템을 재구성하는 경우에도 기술적 문제가 발생할 수 있

다. 구체적으로, 장기간 운영된 태양광 발전 시스템은 스트링 전체의 개방전압 및 동작전압이 설계 시점에 비해 감소하여, 최소 MPPT 동작 범위를 이탈함으로써, 인버터의 가동 중단이나 효율 저하를 야기할 수 있다. 즉, 성능 차이가 큰 모듈 간의 혼용은 정상 모듈에 과도한 부하를 주거나, 상대적으로 성능이 낮은 노후 모듈에 역전압을 형성하여 핫스팟 현상을 발생시키는 원인이 된다. 따라서, 본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 비선형적 출력 특성을 고려하여, 태양광 모듈의 부분 교체에 따른 문제를 해결할 수 있는 다기능 접속장치의 운용 알고리즘을 제안한다.

3. 다기능 접속장치의 구성 및 운용 알고리즘

3.1 다기능 접속장치의 구성

태양광 스트링용 다기능 접속장치는 그림 1과 같이, 제어부와 배터리로 구성되는데, 제어부는 운용 알고리즘을 바탕으로 통신, 연산, 제어를 수행하고, 배터리는 DC/DC 컨버터와 배터리로 구성된다.



[그림 1] 태양광 스트링용 다기능 접속장치의 구성

3.1.1 제어부

제어부는 RS-485 통신을 사용하여, 연계 장치의 정보를 수집하고, 운용 알고리즘을 바탕으로 충/방전 스위치, DC/DC 컨버터를 제어한다. 즉, 연계 장치에서 수집된 정보 중 스트링 전압(또는 태양광 인버터의 입력 전압)과 배터리 전압(또는 DC/DC 컨버터의 통신정보)을 계측하여, 충/방전 스위치 및 DC/DC 컨버터의 충/방전을 제어한다.

3.1.2 배터리부

배터리부는 표 2와 같이, 12V 산업용 연축전지를 적용하며, 제어부에 의해 충/방전 동작이 제어된다. 또한, 운용 알고리즘에 따라, 과충전 및 과방전을 보호하고, DC/DC 컨버터의 충전 최대 전압과 방전 제한 전압으로 고려하여 운용 안전성을 높인다.

표 1 DC/DC 컨버터의 전기적 특성

items	contents
rated voltage	36 [V]
battery voltage range	30~64 [V]
maximum charge/discharge current	30 [A]
maximum PV open circuit voltage	96 [V]
float charging voltage	13.8 [V]
low voltage cutoff voltage	11.1 [V]

표 2 12V 산업용 배터리의 전기적 특성

items	contents
nominal voltage	12 [V]
charging limit voltage	14.8 [V]
discharge limit voltage	10.5 [V]
maximum power	50 [Ah]

3.2 다기능 접속장치의 운용 알고리즘

태양광 스트링용 다기능 접속장치의 운용 알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 태양광 인버터의 운전 시작 전압, 배터리 최대 전압, 배터리 최소 전압을 입력한다.

[Step 2] 태양광 인버터의 입력 전압과 출력 전류를 수신하고, 배터리의 전압을 측정한다.

[Step 3] 태양광 인버터의 출력 전류가 0 이면 [Step 4]로 이동하고, 아니면 [Step 6]로 이동한다.

[Step 4] 입력 전류와 배터리 전압을 더한 값이 운전 시작 전압보다 크고 배터리 전압이 배터리 최소 전압보다 크면, 충전용 스위치 개방 및 방전용 스위치 투입 후 [Step 7]로 이동하고, 아니면 [Step 5]로 이동한다.

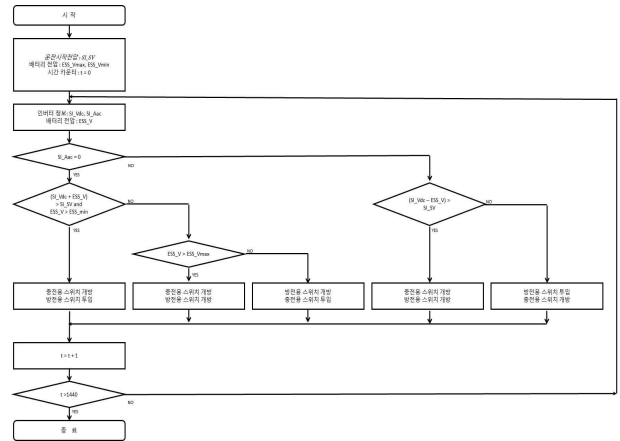
[Step 5] 배터리 전압이 배터리 최대 전압보다 크면, 충전용 스위치 및 방전용 스위치를 개방하고, 아니면 방전용 스위치 개방 및 충전용 스위치 투입 후 [Step 7]로 이동한다.

[Step 6] 태양광 인버터 입력 전압에서 배터리 전압을 뺀 값이 운전 시작 전압보다 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, max 보다 크면 종료한다.

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

상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2] 다기능 접속장치의 운용 알고리즘

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 태양광 스트링용 다기능 접속장치는 표 3과 같은 사양의 태양광 모듈 8장과 연결하고, 표 4와 같은 사양의 태양광 인버터에 연계하여 시험을 수행한다. 또한, 시험 방법은 정상상태에서 태양광 모듈에 이상현상을 발생시키고, 운용 알고리즘에 따른 장치의 동작 특성을 평가한다.

표 3 250W 태양광 모듈의 전기적 특성

항목	STC	NMOT
용량(W)	250 [W]	193 [W]
최대출력전압 (V_{MP})	31.61 [V]	28.8 [V]
최대출력전류 (I_{MP})	8.17 [A]	6.7 [A]
개방전압 (V_{OC})	37.37 [V]	35.5 [V]
단락전류 (I_{SC})	8.486 [A]	7 [A]

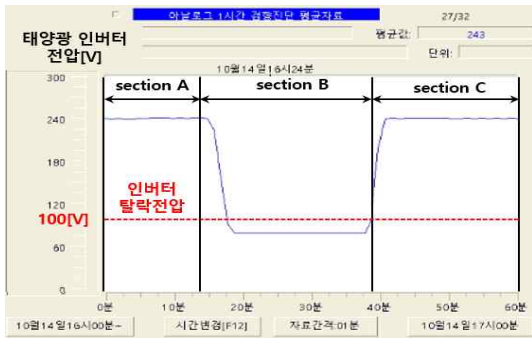
표 4 3.5kW 태양광 인버터의 전기적 특성

항목	내용
운전 전압 범위	100~500 [V]
운전 시작 전압	160 [V]
MPPT 범위	200~400 [V]
정격전압	370 [V]
개방전압	500 [V]
단락전류	18 [A]

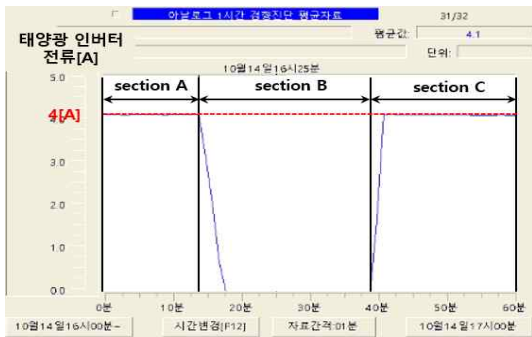
4.2 이상현상 발생에 따른 충전 특성

상기의 시험 조건을 바탕으로 태양광 스트링용 다기능 접속장

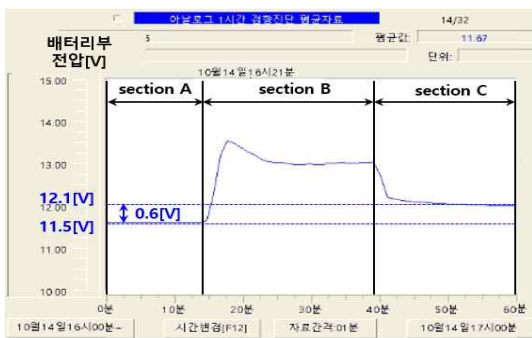
치의 운용 특성을 나타내면 그림 3과 같다. 여기서, 그림 3의 (a), (b), (c)의 section A는 정상상태 구간이고, section B는 이상상태 구간이며, section C는 정상상태로 회복된 구간을 나타낸다. 먼저, 이상현상이 발생한 section B의 경우, 인버터의 출력전압이 100 [V] 미만이고, 출력 전류가 0 [A]로 20 초 이상 유지되어, 상기 3.2절의 운용 알고리즘에 의해 배터리는 충전동작을 수행함을 확인할 수 있다. 또한, section C는 인버터의 출력전압이 MPPT 운전 시작 전압인 160 [V] 이상이고, 출력 전류가 0 [A] 보다 큰 상태를 20초 이상 유지함에 따라, 운용 알고리즘에 의해 충전이 종료됨을 알 수 있다.



(a) 태양광 인버터의 전압특성



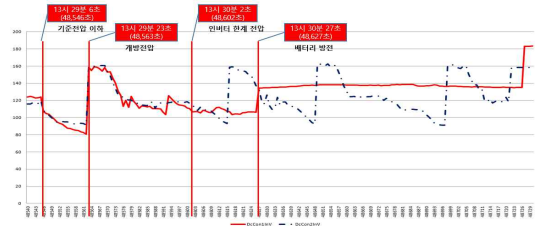
(b) 태양광 인버터의 전류특성



(c) 배터리부의 전압특성

[그림 3] 태양광 스트링용 다기능 접속장치의 운용 특성

치의 방전 특성을 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 그림 4는 인버터의 운전 한계 전압 시 배터리의 방전 특성으로, 13시 29분 6초(48,546초)에 기준전압 이하에서 13시 29분 23초(48,563초)에 개방전압이 되어 다기능 접속장치의 동작 조건인 20초 이상을 만족하지 않는다. 또한, 13시 30분 2초(48,602초)에 인버터 운전 한계 전압을 만족하고, 다기능 접속장치의 동작 조건인 20초를 초과하여 13시 30분 27초(48,627초)에 배터리가 방전됨을 알 수 있다.



[그림 4] 태양광 스트링용 다기능 접속장치의 방전 특성

4. 결 론

본 논문에서는 이상현상이 발생한 태양광 스트링의 에너지를 생산하기 위하여, 인버터의 정지 시에 태양광 스트링의 에너지를 배터리에 저장하는 3.5kW급 태양광 스트링용 다기능 접속장치의 운용 알고리즘을 제안한다. 상기에서 제안한 다기능 접속장치의 운용 특성을 평가한 결과, 이상 현상이 발생한 태양광 스트링의 에너지를 배터리에 저장하고, 인버터의 정상운전 시 방전하여, 본 논문에서 제안한 운용 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

참고문헌

- [1] IEC 61215-1, “지상 태양광발전 모듈-설계 적격성 평가 및 형식 승인-제1-1부: 결정질 실리콘 태양광발전 모듈의 시험에 관한 특별 요구사항”, 2021.02.
- [2] 이현승 외 2명, “태양광발전시스템 국내 지역별 발전특성 분석”, 한국태양에너지학회 논문집, 39권, 제 2호, pp. 33-43, 2019.04.
- [3] 김도선, “태양광 패널의 음영 영역에 따른 태양광 발전 특성 부분 분석”, 한국생산제조학회 추계학술대회 논문집, pp. 316-316, 2017.12.
- [4] 박지훈, “태양광 발전설비의 이용기술과 효율개선에 관한 연구”, 한밭대학교 산업대학원 석사학위논문, 2010.02.

4.3 인버터의 운전 한계 전압 시 방전 특성 상기의 시험 조건을 바탕으로, 태양광 스트링용 다기능 접속장