

20kW급 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 운용 알고리즘에 관한 연구

진진택**, 유현상*, 이수용**, 한병길*, 노대석*
*한국기술교육대학교, **한국폴리텍대학
e-mail:jinfind@koreatech.ac.kr

A Study on the Operation Algorithm of Energy Harvesting Device in 20kW PV modules

Jin-Taek-Jeon**, Hyun-Sang You*, Soo-Yong Lee**,
Byeong-Gill Han*, Dae-Seok Rho*

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

요약

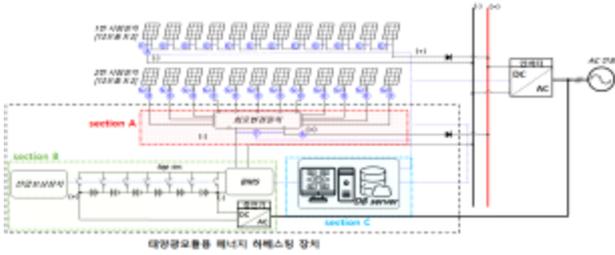
최근, 2050 탄소중립 선언과 그린뉴딜 전략을 통해 기후 변화 대응과 경기부양을 동시에 달성하기 위하여 신재생에너지의 설치용량이 증대되고 있다. 그러나, 신재생에너지 가운데 태양광전원은 모듈을 직렬로 연결한 스트링들이 계통연계용 인버터에 연계되어 있어, 음영 발생 시 스트링이 인버터에서 탈락하는 현상이 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 음영 외 여러 가지 요인으로 계통으로부터 인버터가 탈락하는 현상을 방지하고 태양광전원의 운용효율을 향상시키기 위하여, 회로변경장치부, 전압보상장치부, 감시제어장치부, 등으로 구성된 20kW급 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치와 운용 알고리즘을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 운용특성을 평가한 결과, 태양광 스트링에 음영이 발생하는 경우 본 논문에서 제안한 에너지 하베스팅 장치가 태양광 스트링의 인버터 탈락을 방지하여 태양광전원 전체 시스템의 운용효율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 단기간 Net Zero 달성을 위해 수요 부분의 급속한 전기화 발생과 제10차 전력수급기본계획에 따라 변동성과 간헐성을 지닌 신재생에너지 설비 실효 용량 6.1GW(5.1%)에서 향후 14.5GW(10.0%) 수준으로 증가될 전망이다. 또한, 신재생에너지 중 태양광전원의 보급 현황은 2020년 5.5GW 정점 기록을 하였으며, 신규 설비 용량은 2030년까지 매년 2.5GW ~ 3.0GW 설치될 전망이다. 하지만, 기존의 태양광전원 시스템은 여러 개의 스트링(어레이)이 DC 부스에 병렬로 접속되어 하나의 인버터에 연결되는 방식으로 구성되어, 일부 모듈에 음영이 발생하는 경우에 해당 스트링의 전압이 인버터의 동작전압 미만으로 감소되어, 태양광전원 전체 시스템의 운용 효율이 저하될 가능성이 발생하고 있다. 따라서 본 논문에서는 인버터의 동작전압이 음영 외 여러 가지 요인으로 탈락되는 현상을 방지하는 방안과 태양광 발전량 따른 효율 비교 분석을 하고 태양광 발전의 효율적인 운용을 하기 위해 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 설치를 제안한다. 또한, 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 특성 시험을 통해 음영이 발생시 전압이 일정하게 보상되어, 태양광 전원의 운용효율이 향상됨을 알 수 있다.

2. 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 구성

태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치는 회로변경장치부, 전압보상장치부, 감시제어장치부, 등으로 구성되는데, 기존의 태양광전원에 적용한 개념도는 그림 1과 같이 나타낸다. 여기서, section A는 회로변경장치부로서 음영으로 인해 태양광 인버터가 탈락하는 경우, 음영이 발생하지 않은 정상 모듈을 연결하여 인버터 최소 동작전압 범위 이내로 스트링을 재구성하는 장치로서, 절체 스위치와 와이어, 통신소자 등으로 구성된다. 또한, section B는 배터리와 충전기, 제어장치 등으로 구성된 전압보상장치부로, 상기에서 남은 정상 모듈과 배터리를 투입하여 인버터 최소 동작전압 이상이 되도록 스트링을 구성하는 장치이다. 한편, section C는 PLC와 전압, 전류 센서 등으로 구성된 감시제어장치부로, 센서를 통해 각 태양광 스트링과 모듈의 전압, 전류를 모니터링하고, BMS를 통해 리튬이온배터리의 SOC를 실시간으로 수집하여, 회로변경장치부와 전압보상장치부를 제어하는 기능을 수행한다.

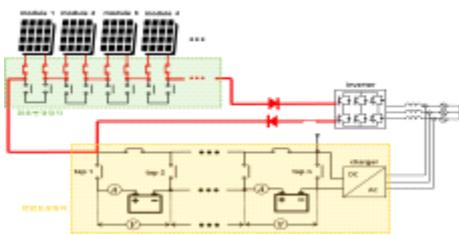


[그림 1] 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 구성도

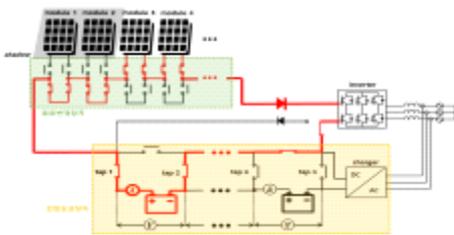
3. 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 운용 알고리즘

3.1 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 운용 방안

태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치는 예비 동작모드, 주 동작모드로 구성되며, 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 2(a)는 태양광 스트링의 전압이 인버터의 동작범위 이내를 유지하여, 회로변경이나 전압보상을 하지 않는 예비 동작모드를 나타낸다. 즉, 태양광 모듈의 출력은 에너지 하베스팅 장치의 바이패스 회로를 통해 인버터 측으로 전달된다. 또한, 그림 2(b)는 음영으로 인해 태양광 스트링의 전압이 인버터 최소 동작전압을 벗어나는 경우, 회로변경장치와 전압보상장치를 이용하여 스트링의 전압을 보상시켜, 인버터의 탈락을 방지하는 주 동작모드를 나타낸다. 여기서, 회로변경장치는 태양광 스트링의 전압이 인버터 최소 동작전압 이하로 감소하는 경우, 스트링에 속한 모듈의 전압을 측정하여 기준값 미만의 비정상 모듈은 MC를 통해 바이패스 회로로 연결하고, 기준값 이상의 정상 모듈을 직렬로 연결하여 인버터 최소 동작전압 이상인 정상 스트링으로 재구성한다. 또한, 전압보상장치는 회로변경장치를 실행한 후 나머지 정상 모듈을 이용하여, 적정한 배터리 모듈을 투입하여 정상 스트링으로 재구성한다.



(a) 예비 동작모드



(b) 주 동작모드

[그림 2] 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 운용모드

3.2 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 운용 알고리즘 상에서 제시한 운용 방안을 바탕으로, 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 운용 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 태양광 스트링의 수(N_{str})와 스트링의 최대 모듈 수($N_{str,mod}$), 인버터 최소 동작전압($V_{inv,min}$), 등의 태양광전원의 사양과 배터리 모듈의 정격전압(V_{bat}), 개수(N_{bat}), 최소 운용 SOC(SOC_{min}) 등의 에너지 하베스팅 장치의 사양을 상정한다. 또한, 태양광 스트링의 번호(s), 모듈의 번호(m), 배터리 모듈의 번호(b), 등을 선정하고, 태양광 스트링의 전압($V_{str}(t,s)$)과 모듈의 전압($V_{mod}(t,s,m)$)를 산정한다.

[Step 2] 각 운용 시간대(t)에 대하여, 정상적인 태양광 모듈의 전압의 합($V_{sum,mod}(t)$)을 0으로 초기화하고, s , m , b 는 1로 설정한다.

[Step 3] 각 시간대에 대하여 s 번째 태양광 스트링의 전압($V_{str}(t,s)$)이 인버터 최소 동작전압($V_{inv,min}$)보다 작아서 해당 스트링이 탈락하는 경우에는 [Step 4]로 진행하고, 정상적이면 [Step 6]으로 이동한다.

[Step 4] 식 (1)에 따라 s 번째 스트링에서 m 번째 모듈의 전압($V_{mod}(t,s,m)$)이 인버터 최소 동작전압을 모듈의 개수로 나눈 값보다 크면 정상 모듈로 분류하고, 식 (2)에 따라 모든 스트링에 대하여 정상 모듈의 전압을 누적한다.

$$V_{mod}(t,s,m) > \frac{V_{inv,min}}{N_{str,mod}} \quad (1)$$

$$V_{sum,mod}(t) = \sum_{s=1}^{N_{str}} \sum_{m=1}^{N_{mod}} V_{mod}(t,s,m) \quad (2)$$

여기서, V_{mod} : 태양광 모듈의 전압, $V_{inv,min}$: 인버터 최소 동작전압, $N_{str,mod}$: 스트링의 최대 모듈 수, t : 운용시간, s : 태양광 스트링 번호, m : 태양광 모듈 번호, $V_{sum,mod}$: 저전압 스트링 내 정상 모듈 전압의 합

[Step 5] m 의 값이 스트링의 최대 모듈 수($N_{str,mod}$)이면 [Step 6]으로 진행하고, 아니면 [Step 4]로 이동한다.

[Step 6] s 의 값이 최대 스트링의 수(N_{str})이면 [Step 7]로 진행하고, 아니면 [Step 3]으로 이동한다.

[Step 7] 회로변경장치에 의해 재구성하는 스트링의 수($I_{str}(t)$)는 식 (3)에 따라 $V_{sum.mod}(t)$ 을 $V_{inv.min}$ 으로 나눈 값($P_{str}(t)$) 가운데, 정수부만을 고려하여 산정한다.

$$P_{str}(t) = \frac{V_{sum.mod}(t)}{V_{inv.min}} \quad (3)$$

$$= I_{str}(t) \cdot J_{str}(t)$$

여기서, I_{str} : 회로변경 장치에 의해 재구성하는 스트링의 수, J_{str} : 회로변경한 후 남은 정상 모듈의 전압을 $V_{inv.min}$ 로 나눈 값

[Step 8] 식 (3)에서 $I_{str}(t)$ 가 0이 아니면, 회로변경장치를 실행한다. 즉, MC를 통해 정상 모듈을 직렬로 연결하여 $I_{str}(t)$ 개의 새로운 스트링으로 재구성한다.

[Step 9] 식 (3)에서 회로변경장치를 실행한 후 남은 정상 모듈의 전압의 합($J_{str}(t)$)이 0이 아니면, [Step 10]으로 진행하고, 아닌 경우 [Step 13]으로 이동한다.

[Step 10] 인버터 최소 동작전압 이상의 스트링을 구성하기 위한 최소 보상전압($V_{comp.min}(t)$)은 식 (4)에 따라 회로변경장치를 실행한 후 남은 정상 모듈의 전압을 고려하여 산정한다. 또한, 전압보상장치의 배터리 탭($I_{bat.tap}(t)$)은 식 (5)에 따라 최소 보상전압을 배터리 모듈의 정격전압(V_{bat})으로 나눈 값을 절상하여 산정한다.

$$V_{comp.min}(t) = (1 - J_{str}(t)) \times V_{inv.min} \quad (4)$$

$$I_{bat.tap}(t) = \left\lceil \frac{V_{comp.min}(t)}{V_{bat}} \right\rceil \quad (5)$$

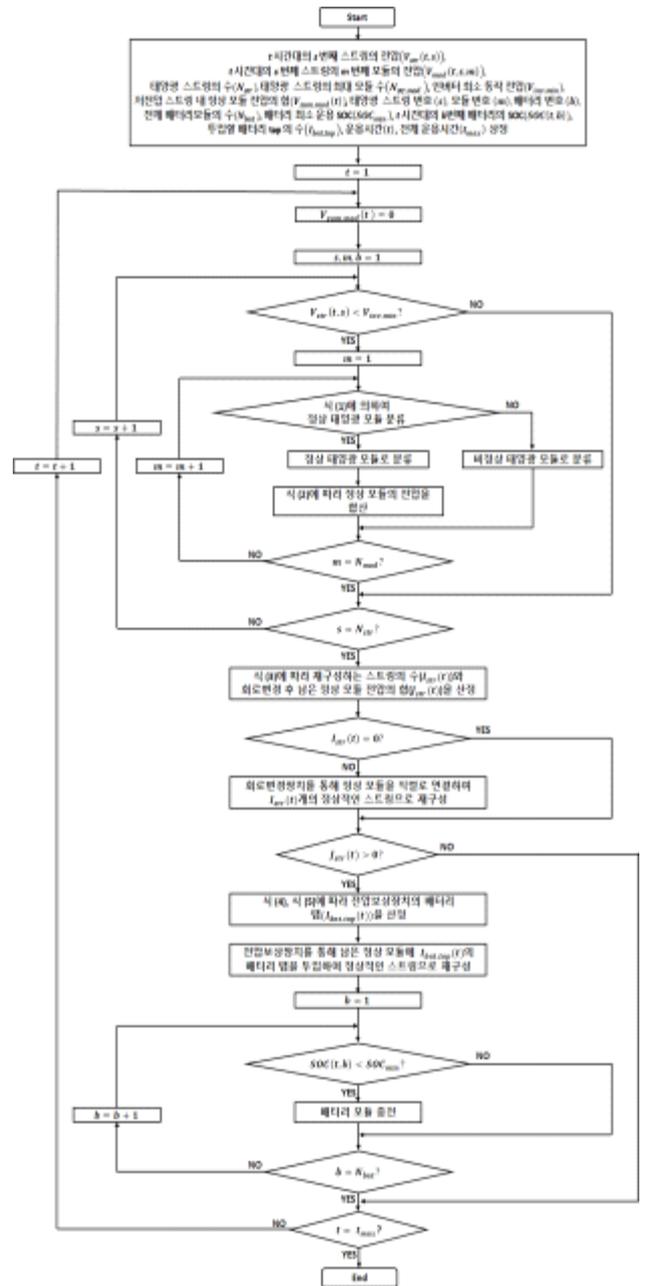
여기서, $V_{comp.min}$: 정상 스트링을 구성하기 위한 최소 보상 전압, $I_{bat.tap}$: 전압보상장치의 배터리 탭

[Step 11] 배터리 탭($I_{bat.tap}(t)$)이 0이면 [Step 13]으로 이동하고, 아니면, 회로변경장치를 실행한 후 남은 정상 모듈과 배터리를 투입하여, 전압보상장치에 의해 정상적인 스트링으로 재구성한다.

[Step 12] t 시간대에 대하여 모든 배터리 모듈의 SOC를 측정하고, 최소 운용 SOC(SOC_{min}) 이하이면 개별적으로 충전한다.

[Step 13] t 가 t_{max} 이면 알고리즘을 종료하고, 아니면 [Step 2]로 이동하여 해당 과정을 반복한다.

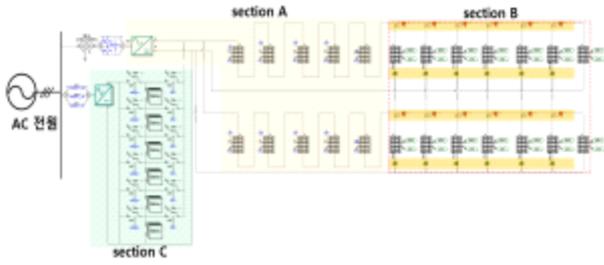
따라서, 상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 3와 같다.



[그림 3] 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 운용 알고리즘

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 20kW급 에너지 하베스팅 장치 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 20[kW]급 태양광모듈용 에너지 하베스팅 장치의 전체 시스템의 모델링을 나타내면 그림 4과 같다. 여기서, section A는 태양광전원부, section B는 회로변경장치부, section C는 전압보상장치부를 나타낸다.

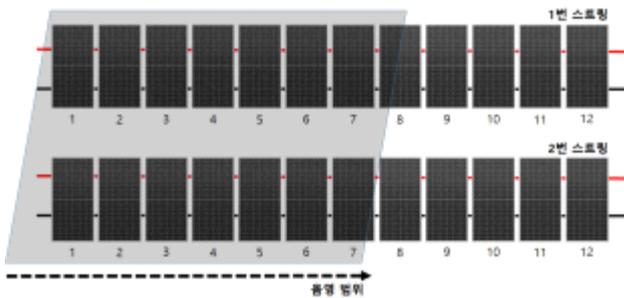


[그림 4] 전체 시스템 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 운용특성을 평가하기 위한 태양광전원의 음영발생 조건은 그림 5과 같다. 여기서, 음영은 좌측에서 우측 방향으로 발생하는 것으로 상정한다. 또한, 기존의 방식과 에너지 하베스팅 장치의 운용특성을 비교 분석하기 위한 상정 시나리오를 나타내면 표 1과 같다.



[그림 5] 태양광전원의 음영 조건

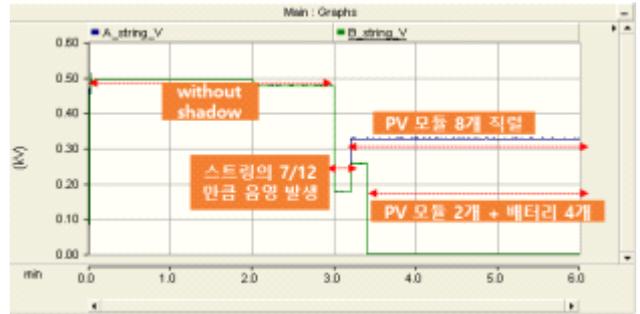
[표 1] 태양광모듈용 에너지 하베스팅 장치의 시뮬레이션 조건

방식	음영	에너지 하베스팅 장치	
		회로변경장치	전압보상장치
제안한 방식	PV 스트링의 7/12	모듈 8개	PV 모듈 2 개 + 배터리 4개 투입

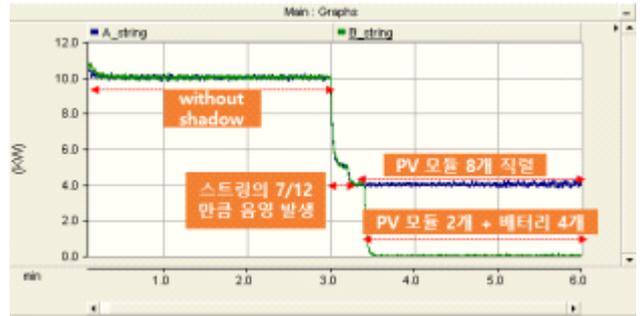
5.2 에너지 하베스팅 장치의 모델링에 의한 태양광전원의 운용특성

음영이 태양광 스트링에 7/12 만큼 발생한 경우, 태양광전원의 운용특성을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6의 (a)는 태양광 인버터의 전압을 나타내는데, 음영이 태양광 스트링의 7/12만큼 발생하면 전압이 200[V]로 산정되어, 태양광 인버터가 탈락되어야 하지만, 회로변경장치가 2번 스트링의 태양광 모듈 3개를 1번 스트링과 직렬로 연결하여 인버터의 최소 동작전압을 만족하는 모듈 8개의 새로운 스트링으로 구성한다. 그러나 회로변경 후 남은 2번 스트링의 태양광 모듈 2개에 배터리 4개를 투입하여 보상해도 배터리 모듈의 수가

부족하여 인버터가 탈락함을 알 수 있다. 한편, 그림 6의 (b)는 태양광 인버터의 출력을 나타내는데, 음영이 태양광 스트링의 7/12 만큼 발생되면, 회로변경장치에 의한 태양광 스트링의 출력은 4[kW]로 산정되지만, 전압보상장치에 의한 스트링의 출력은 0[kW]로 산정되어, 태양광 인버터가 계통에서 탈락됨을 알 수 있다. 따라서, 에너지 하베스팅 장치를 운용하는 경우, 충분한 수량의 배터리 모듈이 요구됨을 알 수 있다.



(a)태양광 인버터의 전압



(b)태양광 인버터의 출력

[그림 6] 에너지 하베스팅 장치에 의한 태양광전원 운용특성(음영 7/12)

6. 결 론

본 논문에서는 음영에 의한 태양광전원용 인버터의 탈락을 방지하기 위하여, 운용효율을 향상시킬 수 있는 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 구성과 운용 알고리즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 20kW 에너지 하베스팅 장치의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 음영이 발생할 경우 제안한 운용 알고리즘에 의하여 태양광 스트링의 인버터 탈락을 방지함으로써 태양광 전체 시스템의 운용효율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

[1] 한국에너지공단, “제5차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획”, 보도자료, 2020.12.