

태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 타당성 평가에 관한 연구

전진택*, 유현상*, 최성문*, 이명근*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

jinfind@koreatech.ac.kr

A Study on Economic Evaluation of Energy Harvesting Device for PV module

Jin-Taek Jeon*, Hyun-Sang You*, Sung-Moon Choi*, Myung-Heun Lee* and
Dae-Seok Rho*

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

요 약

최근, 태양광 전원은 신재생에너지전원 중 설치비가 가장 낮고 설치기간이 짧기 때문에 많은 관심이 집중되고 있다. 하지만, 태양광 전원은 주변 기후조건에 따라 출력이 크게 변동되고, 일부 모듈에만 음영이 발생하여도 전체적인 운용 효율이 저하되는 문제점이 발생하고 있다. 즉, 태양광 전원에서는 모듈을 직렬로 연결한 스트링들이 인버터에 연계되어 있으므로, 일부 모듈에 부분 음영이 발생하면 해당 스트링의 전압이 인버터의 동작전압 범위를 벗어나게 되어, 해당 스트링이 인버터에서 탈락되는 현상이 발생할 수 있다 따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점에 대한 대응책으로 음영이 발생하지 않은 모듈로 스트링을 재구성하는 회로변경 장치부와 리튬이온배터리를 이용하여 음영이 발생한 태양광 모듈의 전압을 보상하는 전압 보상장치부로 구성된 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치를 제안한다. 또한, 본 논문에서는 에너지 하베스팅 장치를 도입하는 경우, 발전량 개선율에 따른 경제성을 판단하기 위한 비용 요소와 편익 요소로 구성된 경제성평가 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 설치 비용에 따른 ROI를 산출하여 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 상용화에 대한 타당성을 평가한다.

1. 서 론

정부의 '재생에너지 3020 이행계획'에 따라 2030년까지 신재생에너지의 발전비중을 20[%](20.1[GW])까지 달성하는 것을 목표로 하고 있고, 날씨조건에 따른 발전효율의 저하를 감안하여 신재생 에너지의 설치용량을 63.8[GW]까지 늘리는 계획을 추진하고 있다. 특히, 태양광 전원은 기타 신재생에너지전원에 비해 설치비가 가장 저렴하고 설치기간이 비교적 짧다는 장점으로 인하여, 2030년까지 전체 신재생에너지 설치용량의 57[%]인 36.5[GW]까지 도입될 전망이다[1]. 하지만, 기존의 태양광 전원 시스템은 여러 개의 스트링이 DC 부스에 병렬로 접속되어 하나의 인버터에 연결되는 방식으로 구성되어, 일부 모듈에 음영이 발생하는 경우에 해당 스트링 전압이 인버터의 동작전압 이하로 감소되어, 태양광 전원 전체 시스템의 운용 효율이 저하될 가능성이 있다.

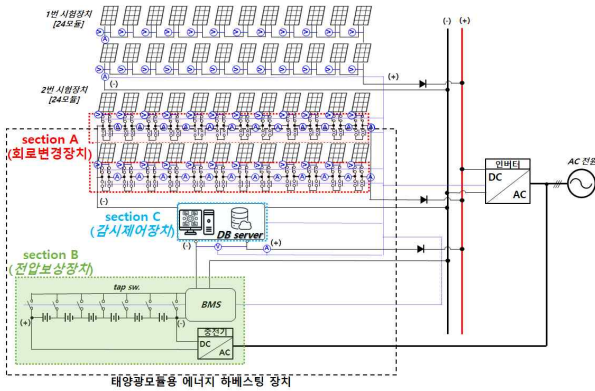
따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점에 대한 대응책으로 음영이 발생하지 않은 모듈로 스트링을 재구성하는 회로변경 장치부와 리튬이온배터리를 이용하여 음영이 발생한 태양광 모듈의 전

압을 보상하는 전압 보상장치부로 구성된 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치를 제안한다. 또한, 본 논문에서는 에너지 하베스팅 장치 도입의 타당성을 평가하기 위하여, 비용 요소와 편익 요소로 구성된 경제성평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 태양광 발전 출력에 따른 에너지 하베스팅 장치의 경제성을 평가한 결과, 손익분기점이 에너지 하베스팅 장치의 설치 비용과 출력량 개선율에 따라 변동됨을 알 수 있다. 즉, 에너지 하베스팅 장치를 도입하여 태양광 전원의 발전량이 1[%] 정도 개선되는 경우, 80,000[천원/MW] 이하의 에너지 하베스팅 장치를 도입하면, 타당성 측면(ROI, 7.9년)에서 적합하고, 2[%]의 발전량이 개선되는 경우에는 120,000[천원/MW] 이하의 에너지 하베스팅 장치를 도입해도 타당성 측면에서 우수함을 알 수 있다.

2. 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 구성

태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치는 그림 1과 같이 회로변경 장치부, 전압보상 장치부, 감시제어 장치부 등으로 구성한다. 여기서, section A는 회로변경 장치부로서 음영으로 인한 계통 연계용 인버터가 탈락하는 경우, 음영의 발생하지 않은 정상 모

들을 연결하여 인버터 최소 동작전압 범위 이내로 스트링을 구성하는 장치로서, 절체 스위치(magnetic contactor, MC)의 측정 신호, 통신기기 등으로 구성한다. 또한, section B는 리튬이온배터리 충전기, 제어장치 등으로 구성된 전압보상 장치부로, 상기에서 남은 모듈과 배터리를 투입하여 인버터 최소 동작전압 이상이 되도록 스트링을 구성하는 장치이다. 한편, section C는 프로그램머블 로직 컨트롤러(programmable logic controller, PLC)와 전압, 전류 센서 등으로 구성된 감시제어 장치부로, 센서를 통해 각 태양광 스트링과 모듈의 전압, 전류를 모니터링하고, 배터리관리시스템(battery management system, BMS)을 통해 리튬이온배터리의 잔존용량(state of charge, SOC)을 실시간으로 수집하여, 회로변경 장치부와 전압보상 장치부를 제어하는 기능을 수행한다.



[그림 1] 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 구성

3. 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 경제성 평가 모델링

3.1 비용요소

태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 비용은 회로변경 장치부와 전력보상 장치부, 감시제어 장치부로 구성되며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 회로변경 장치부의 비용은 식 (1)의 1항과 같이, 절체스위치 비용과 설치되는 개수를 고려하여 산정한다. 또한, 전력보상 장치부의 비용은 식 (1)의 2항 ~ 4항과 같이, 배터리 비용, AC/DC 충전기 비용, BMS 비용으로 구성된다. 여기서, 식 (1)의 2항은 배터리에 대한 비용으로 kWh 단가로 나타내며, 초기 배터리 비용과 y년도에 발생하는 교체비용에 대하여 할인율을 고려하여 산정한다. 식 (1)의 3항은 AC/DC 충전기의 비용으로 충전기 용량에 대하여 kW 단가로 산정하며, 4항은 배터리의 BMS 비용으로 배터리 비용의 일정 비율을 고려하여 산정한다. 한편 감시제어 장치부의 비용은 식 (1)의 5항과 같이 센서류를 포함한 운용소프트웨어 비용으로 구성된다.

$$C_{regul} = C_{cir} + C_{bat} \cdot Q_{bat} \cdot [1 + (1-d)^y] + C_{chg} \cdot Q_{chg} + C_{bms} + C_{remot} \quad (1)$$

여기서, C_{regul} : 에너지 하베스팅 장치의 비용, C_{cir} : 회로변경 장치부의 비용[원], C_{bat} : 배터리 모듈단가[원/kWh], Q_{bat} : 배터리 모듈 용량[kWh], d : 할인율[%], y : 교체 연도[년], C_{chg} : AC/DC 충전기 비용[원], Q_{chg} : AC/DC 충전기 용량[원/kW], C_{bms} : BMS 비용[원], C_{remot} : 감시제어장치비용

한편, 운용비용은 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치를 운용할 때 발생하는 비용으로서, 식 (2)와 같이 초기 설치 비용의 일정비율로 산정한다.

$$C_{oper} = \sum_{i=1}^n C_{regul}(i) \cdot R_{oper} \quad (2)$$

여기서, C_{oper} : 총 운용비용[원], R_{oper} : 적용률[%], n : 경제성 평가년도

3.2 편익요소

전력량 요금은 발전사업자가 태양광 전원의 발전량에 대해 전기판매사업자에게 받는 전력판매 요금으로서, 식 (3)과 같이 태양광 전원의 월평균 발전량에 전력거래단가(SMP)를 곱하여 산정한다. 여기서, 태양광 전원의 월평균 발전량은 식 (4)와 같이 태양광 전원의 설비용량에 이용률과 월간 운용시간을 곱하여 산정한다.

$$B_{SMP} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (ER_{SMP}(i,j) \cdot P_{PV,m}) \quad (3)$$

$$P_{PV,m} = k \cdot Q_{PV} \cdot U_{PV} \quad (4)$$

여기서, B_{SMP} : 총 전력량요금[원], $ER_{SMP}(i,j)$: 전력거래단가[원/kW], i : 대상년도, j : 개월, $P_{PV,m}$: 태양광 전원의 월평균 발전량[kWh], k : 월간 운용시간(720 시간), Q_{PV} : 태양광 전원의 설비용량[kW], U_{PV} : 태양광 전원의 이용률[%]

또한, 태양광 전원의 REC(renewable energy certificate) 요금은 발전량에 비례하여 발전사업자가 받는 인센티브 요금으로서, 해당 월의 태양광 전원 발전량과 REC 단가, 가중치를 고려하여, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{REC} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (ER_{REC}(i,j) \cdot WF(i,j) \cdot P_{PV,m}) \quad (5)$$

여기서, B_{REC} : 총 태양광 전원 REC 요금[원], $ER_{REC}(i,j)$: REC 단가[원/kWh], $WF(i,j)$: 태양광 전원의 REC 가중치

한편, 에너지 하베스팅 장치에 의한 발전량 증가분의 편익은 식 (6)과 같이 전력량요금과 REC 요금을 고려하여 산정한다.

$$B_{regul} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [ER_{SMP}(i,j) + ER_{REC}(i,j)] \cdot P_{\Delta}(i,j) \quad (6)$$

여기서, B_{regul} : 에너지 하베스팅 장치에 의한 발전량 증가분의 편익, $P_{\Delta}(i,j)$: 에너지 하베스팅 장치에 의한 발전량 증가율

3.3 현재가치 환산법

경제성 평가를 위한 비용과 편익의 요소는 미래에 발생하는 가치로서, 현재의 가치로 환산하여 평가해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 식 (7)과 같이, 미래의 가치에 대하여 할인율을 적용한 현재가치 환산법(present worth method)을 이용하여 비용과 편익요소를 산정한다.

$$C_{pw} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{flow,i}}{(1+d)^i} \quad (7)$$

여기서, C_{pw} : 현재가치로 환산된 금액[원], $C_{flow,i}$: i 년도의 현금흐름[원], d : 할인율[%]

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

제안한 모델링을 바탕으로 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치의 경제성을 평가하기 위한 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 에너지 하베스팅의 설치 비용은 15년 동안 원금을 균등 상환하는 것으로 가정하며, 은행에서 차입하는 이자율은 5.5[%], 연간 운용비는 초기 설치비의 2.5[%], 할인율은 5.5[%]로 상정한다. 또한, 태양광 전원의 SMP와 REC 요금은 2015년부터 2024년도의 평균 단가인 109.84[원/kWh]와 79.95[원/kWh]를 적용한다. 한편, 에너지 하베스팅 장치의 설치 비용은 MW당 120,000[천원]으로 상정하고, 기술의 진보에 따른 가격하락을 반영하여 100,000[천원/MW], 80,000[천원/MW], 60,000[천원/MW]의 비용을 상정한다.

[표 1] 경제성 평가 조건

항 목	내 역
경제성 평가 기간 [년]	20
태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치 비용 [천원/MW]	120,000
	100,000
	80,000
	60,000
태양광 전원의 이용률 [%]	15
할인율 [%]	5.5
이자율 [%]	5.5
SMP 단가 [원/kWh]	109.84
REC 단가 [원/kWh]	79.95
상환 기간 [year]	15

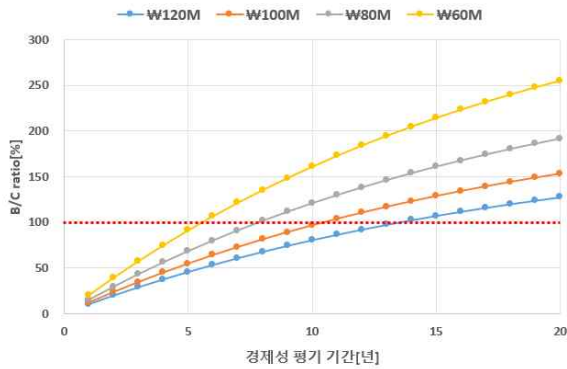
4.2 태양광 전원의 발전량 개선율에 따른 경제성 평가

4.2.1 태양광 전원의 발전량을 1[%] 개선한 경우

표 2와 그림 2는 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치를 도입하여 태양광 전원의 발전량을 1[%] 개선한 경우, 4개의 초기 설치 비용에 대한 편익비율(B/C ratio, benefit-cost ratio)을 나타낸 것이다. 여기서, 에너지 하베스팅 장치의 초기 설치 비용이 120,000[천원/MW], 100,000[천원/MW], 80,000[천원/MW], 60,000[천원/MW]인 경우, 최종년도에서의 편익비율이 각각 127[%], 153[%], 191[%], 255[%]로 산정되고, ROI 기간은 각각 13.6년, 10.5년, 7.9년, 5.6년이며, B/C ratio가 100[%]를 초과하여 순이익이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치를 도입하여 태양광 전원의 발전량을 1[%] 개선하는 경우, 향후 에너지 하베스팅 장치의 가격하락을 고려하면 사업 타당성 측면에서, 에너지 하베스팅 장치의 설치 비용이 80,000[천원/MW] 이하일 경우에 경제적임을 알 수 있다.

[표 2] 태양광 전원의 발전량 개선율이 1[%]인 경우의 ROI 특성

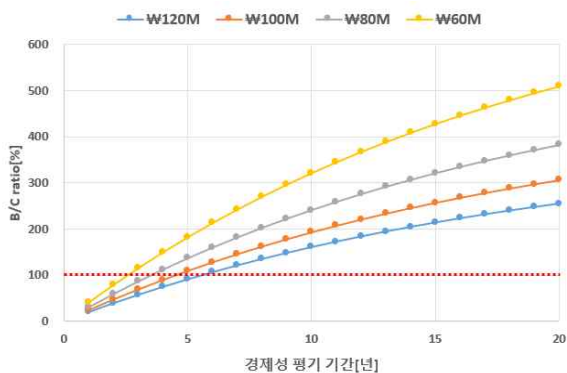
연도	에너지 하베스팅 장치 비용 [천원]			
	120,000	100,000	80,000	60,000
1	10.1	12.1	15.2	20.2
2	19.7	23.6	29.5	39.4
3	28.8	34.5	43.2	57.6
4	37.4	44.9	56.1	74.8
5	45.6	54.7	68.3	91.1
6	53.3	63.9	79.9	106.6
7	60.6	72.7	90.9	121.2
8	67.6	81.1	101.4	135.1
9	74.2	89.0	111.2	148.3
10	80.4	96.5	120.6	160.8
11	86.3	103.6	129.5	172.7
12	91.9	110.3	137.9	183.9
13	97.3	116.7	145.9	194.5
14	102.3	122.8	153.4	204.6
15	107.1	128.5	160.6	214.2
16	111.6	133.9	167.4	223.2
17	115.9	139.1	173.8	231.8
18	120.0	144.0	180.0	239.9
19	123.8	148.6	185.7	247.7
20	127.5	153.0	191.2	255.0



[그림 2] 태양광 전원의 발전량 개선율이 1[%]인 경우의 B/C ratio 특성

4.2.2 태양광 전원의 발전량을 2[%] 개선한 경우

그림 3은 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치를 도입하여 태양광 전원의 발전량을 2[%] 개선한 경우, 4개의 초기 설치 비용에 대한 B/C ratio 특성을 나타낸 것이다. 여기서, 에너지 하베스팅 장치의 초기 설치 비용이 120,000[천원/MW], 100,000[천원/MW], 80,000[천원/MW], 60,000[천원/MW]인 경우, 최종년도에서의 편익비율이 각각 225[%], 306[%], 382[%], 510[%]으로 산정되고, ROI 기간은 각각 5.6년, 4.6년, 3.6년, 2.6년이며, B/C ratio가 100[%]를 초과하여 순이익이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치를 도입하여 태양광 전원의 발전량을 2[%] 개선하는 경우, 향후 에너지 하베스팅 장치의 가격하락을 고려하면 사업 타당성 측면에서, 에너지 하베스팅 장치의 설치 비용이 120,000[천원/MW] 이하일 경우에 경제적임을 알 수 있다.

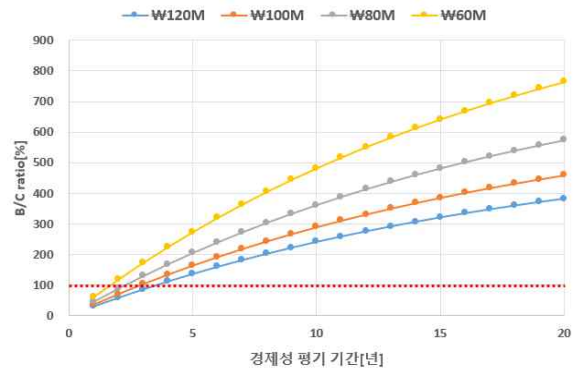


[그림 3] 태양광 전원의 발전량 개선율이 2[%]인 경우의 B/C ratio 특성

4.2.3 태양광 전원의 발전량을 3[%] 개선한 경우

그림 4는 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치를 도입하여 태양광 전원의 발전량을 3[%] 개선한 경우, 4개의 초기 설치 비용에 대한 B/C ratio 특성을 나타낸 것이다. 여기서, 에너지 하베스팅 장치의 초기 설치 비용이 120,000[천원/MW], 100,000[천원/MW], 80,000[천원/MW], 60,000[천원/MW]인 경우, 최종년도에서의 편익비율이 각각 382[%], 459[%], 574[%], 765[%]

으로 산정되고, ROI 기간은 각각 3.6년, 2.9년, 2.3년, 1.7년이며, B/C ratio가 100[%]를 초과하여 순이익이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 태양광 모듈용 에너지 하베스팅 장치를 도입하여 태양광 전원의 발전량을 3[%] 개선하는 경우, 향후 에너지 하베스팅 장치의 가격하락을 고려하면 사업 타당성 측면에서, 에너지 하베스팅 장치의 설치 비용이 120,000[천원/MW] 이하일 경우에 경제적임을 알 수 있다.



[그림 4] 태양광 전원의 발전량 개선율이 3[%]인 경우의 B/C ratio 특성

5. 결 론

본 논문에서는 에너지 하베스팅 장치 도입의 타당성을 평가하기 위하여, 비용 요소와 편익 요소로 구성된 경제성평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 태양광 발전 출력에 따른 에너지 하베스팅 장치의 경제성을 평가한 결과, 손익분기점이 에너지 하베스팅 장치의 설치 비용과 출력량 개선율에 따라 변동됨을 알 수 있다. 즉, 에너지 하베스팅 장치를 도입하여 태양광 전원의 발전량이 1[%] 정도 개선되는 경우, 80,000[천원/MW] 이하의 에너지 하베스팅 장치를 도입하면, 타당성 측면(ROI, 7.9년)에서 적합하고, 2[%]의 발전량이 개선되는 경우에는 120,000[천원/MW] 이하의 에너지 하베스팅 장치를 도입해도 타당성 측면에서 우수함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 김헌태, 장성주, “3020 신재생에너지 정책의 성공적 달성을 위한 전력계통 안정화 핵심기술 개발 방향”, 전기학회논문지, Vol.67, No.2, pp.149–157, 2018