

태양광모듈의 성능저하율을 고려한 폐기진단 알고리즘에 관한 연구

박지현, 이후동, 태동현, 페레이라 마리토, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

A Study on Disposal Diagnosis Algorithm of PV Modules Considering Performance Degradation Rate

Ji-Hyun Park, Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae, Marito Ferreira and Dae-Seok Rho*
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 최근, 기후변화 및 에너지고갈 등의 문제를 대응하기 위하여, 정부에서 추진하는 재생에너지 3020 정책을 기반으로 태양광전원을 포함한 신재생에너지의 설치가 큰 폭으로 증가되고 있다. 하지만, 설치된 태양광모듈은 주변 환경요인에 따라 다양한 열화현상이 발생하여, 전기적 성능과 수명이 크게 감소될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 태양광모듈 판매사업자가 제시한 기대 수명 이전에 새로운 모듈로 교체되는 경우가 증가하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 태양광모듈의 성능저하율을 고려하여, 폐기 또는 새로운 모듈로 교체하는 시기를 평가할 수 있는 폐기진단 알고리즘을 제안한다. 또한, 비용요소와 편익요소로 구성된 경제성평가 모델링을 제시하고, 제안한 알고리즘을 바탕으로 태양광모듈의 성능저하율에 따른 경제성을 평가한 결과, 교체하기 전의 태양광모듈의 성능저하율은 3[%]이고, 교체한 경우의 성능저하율은 1[%]인 경우, 설치 후 10년째에 태양광모듈을 교체하는 것이 가장 큰 값(1.347)의 B/C ratio을 가지므로 최적의 경제적인 교체연도임을 알 수 있다. 따라서, 폐기 또는 교체 판별 여부와 어느 시기에 교체하는 것이 가장 경제적인가를 판단할 수 있어, 본 논문에서 제시한 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

Abstract Recently, the installation of renewable energy including PV systems in distribution systems has increased energetically to cope with climate change and energy shortages according to the government's policy of renewable energy 3020. On the other hand, the electrical performance and lifespan of PV modules installed outdoors can be decreased considerably due to a range of deterioration phenomena depending on the ambient environmental factors. To overcome these problems, replacement of degraded PV modules with new ones is increased before the lifespan guaranteed by the makers of PV modules. Therefore, this paper proposes a disposal diagnosis algorithm to evaluate the time interval of the optimal replacement for PV modules according to performance degradation rate of PV modules. In addition, this study modeled an economic evaluation, which is composed of the cost and benefit of PV systems. From the simulation results based on the proposed modeling and algorithm to consider the performance degradation rate specifically, the replacement approach was found to have the best B/C ratio in 10th year with a 3[%] degradation rate and the disposal diagnosis algorithm of PV modules are useful and practical tools for economic evaluations of the replacement of PV modules.

Keywords : PV System, Economic Evaluation, Performance Degradation Rate, Degradation Phenomenon, Disposal Diagnosis Algorithm

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20172410100030)와 한국에너지기술평가원의 연구(No.20182410105070)에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received August 27, 2019

Revised September 30, 2019

Accepted October 4, 2019

Published October 31, 2019

1. 서론

최근, 국내에서는 미세먼지와 같은 기후변화 문제로 인하여, 안전하고 친환경적인 에너지에 대한 관심이 높아짐에 따라, 신재생에너지전원에 대한 사회적 요구가 지속적으로 증가되고 있다[1]. 따라서, 2030년까지 신재생에너지전원의 비중을 전체 에너지전원의 20[%]까지 확대하는 재생에너지 3020 정책이 적극적으로 추진되고 있으며, 정부의 지원 하에 지자체와 발전사업자들을 중심으로 대규모 태양광전원의 설치가 큰 폭으로 증가되고 있다[2-4]. 또한, 기존의 선행된 연구에서는 태양광전원을 경제적으로 설치하기 위하여, 태양광전원의 설치규모, 용도 등에 관한 태양광전원의 경제성평가가 활발히 진행되고 있다[5]. 그러나, 일반적으로 태양광모듈은 20년 이상 장기적으로 사용할 수 있다고 알려져 있지만, 설치된 주변 환경요인(염분, 온도, 습도, 자외선, 음영 등)에 따라 다양한 열화현상이 발생하여, 전기적 성능과 수명이 크게 감소할 수 있다[6]. 특히, 해안지역의 경우, 염분 및 습도 등의 기후, 환경적인 요인으로 인해 열화현상이 발생하여, 태양광모듈의 성능 저하가 현저하게 나타나고 있는 실정이다. 이에 따라, 태양광모듈 판매사업자가 제시한 기대 수명 이전에 새로운 모듈로 교체하는 경우가 증가하고 있으며, 태양광모듈의 성능저하율에 따라 어느 시기에 교체하는 것이 가장 경제적인가를 평가하는 알고리즘이 요구되어지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점들을 해결하기 위하여, 태양광모듈의 열화특성을 분석하고, 태양광모듈의 성능저하율을 고려한 경제성평가 모델링 및 폐기진단 알고리즘을 제안한다. 즉, 태양광 발전사업자가 태양광모듈을 폐기하여 새로운 모듈로 교체하는 경우에 대하여, 태양광모듈의 성능저하율에 따라 폐기 및 교체 판별 여부와 최적 교체시기를 판단하는 태양광모듈 폐기진단 알고리즘을 제시한다. 제안한 알고리즘을 바탕으로 태양광모듈의 폐기진단 경제성을 평가한 결과, 태양광모듈의 성능저하율에 따라 교체 판별 여부와 어느 시기에 교체하는 것이 가장 경제적인가를 판단할 수 있어, 본 논문에서 제시한 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

2. 태양광모듈의 열화특성 분석

일반적으로 태양광전원은 20년 이상의 수명을 가지는 태양광모듈을 사용하고 있지만, 설치된 환경요인(일사량,

온도, 음영, 염분, 습도, 자외선 등)에 따라 Table 1과 같이 다양한 열화현상이 발생하여, 전기적 성능과 수명이 크게 감소되고 있다[7]. 예를 들어, 해양환경에 영향을 받는 태양광전원의 경우, 설치 환경이 다습하거나 염분에 장기간 노출되어 봉지재 변색(encapsulant discoloration), 리본와이어 부식(ribbon wire corrosion), 백시트 박리(back sheet delamination), 셀 크랙(cell crack) 등이 발생하며, 이로 인해 모듈의 절연특성이 나빠져 열화현상이 발생하여, 이로 인해 모듈의 절연특성이 나빠져 열화현상이 발생하여, 전기적 성능과 수명이 크게 감소되고 있는 실정이다[8-9]. 여기서, 실제 해양환경에서 태양광전원의 장기 노출로 인해 발생하는 고장 단계를 나타내면 Fig. 1과 같으며, 다양한 열화 요인으로 인해 태양광모듈의 성능 저하, 화재 및 인명피해 등이 발생한 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 태양광모듈의 설치 환경에 따라 발생하는 태양광모듈의 성능저하율을 고려하여 경제성평가 모델링 및 폐기진단 알고리즘을 제안하고자 한다.

Table 1. Degradation phenomenon classification of PV modules

| environmental factor | degradation phenomenon |
|------------------------------------|---|
| ultraviolet high temperature | encapsulant discoloration (yellowing, whitening) |
| high temperature humidity | ribbon wire corrosion |
| temperature difference humidity | back sheet delamination |
| temperature difference | cell crack |

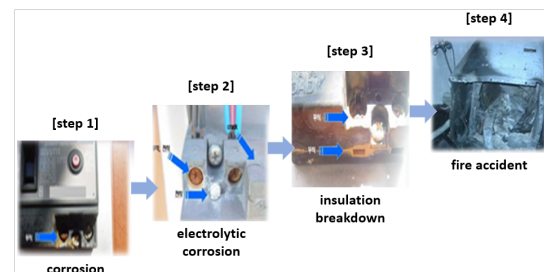


Fig. 1. Degradation characteristics of PV modules in coast environment

3. 태양광모듈의 성능저하율을 고려한

경제성평가 모델링

3.1 비용요소 모델링

비용요소는 태양광전원의 건설비용과 운영비용, 교체비용으로 구성되며, 여기서, 교체비용은 태양광모듈의 기술 진보에 따른 가격 하락을 고려하여 적용한다.

(1) 건설비용

건설비용은 태양광전원을 건설하는데 지출되는 총 비용으로서, 식 (1)과 같이 직접비와 간접비에 대하여 태양광전원의 용량을 곱하여 산정한다. 여기서, 직접비는 태양광모듈의 단가, 인버터, 설치공사비 등이 있고, 간접비는 인허가비용, 표준시설 부담금, 부가세 등을 고려한다.

$$C_{con} = (C_{di} + C_{indi}) \cdot Q_{PV} \quad (1)$$

여기서, C_{con} : 초기 건설비용(원), C_{di} : 태양광전원건설비용의 직접비(원/kW), C_{indi} : 태양광전원 건설비용의 간접비(원/kW), Q_{PV} : 태양광전원의 용량(kW)

(2) 태양광모듈의 교체비용

교체비용은 태양광모듈의 교체로 인해 추가로 발생하는 비용으로서, 폐기연도를 기준으로 태양광모듈의 초기 설치 비용에 태양광모듈의 가격 하락률을 곱하여 식 (2)와 같이 산정한다.

$$C_{ch}(x) = C_{pv} \cdot (1 - R_{drop})^x \quad (2)$$

여기서, $C_{ch}(x)$: 폐기연도에 따른 태양광모듈의 교체비용(원), x : 폐기연도, C_{pv} : 태양광모듈의 초기설치 비용(원), R_{drop} : 태양광모듈의 가격하락률

(3) 운영비용

운영비용은 태양광전원을 운영할 때 발생하는 비용으로서, 식 (3)과 같이 건설비용에 대한 일정 값을 곱하여 산정한다[9].

$$C_{oper}(y) = C_{con} \cdot R_{oper} \quad (3)$$

여기서, $C_{oper}(y)$: 해당연도의 운영비용(원), y : 해당연도, R_{oper} : 상수값

3.2 편익요소 모델링

편익요소는 신재생에너지 의무할당제(RPS, renewable energy portfolio standard) 시행에 따른 전력량요금, REC 요금 및 탄소배출권 요금을 적용한다. 태양광모듈의 교체로 인하여 추가적으로 발생하는 편익은 기술 진보로 인해 향상된 성능저하율을 고려한다.

(1) 전력량요금

전력량 요금(SMP, system marginal price)은 발전사업자가 태양광전원의 발전량에 대해 전기판매사업자에게 받는 전력판매 요금으로서, 식 (4)와 같이 해당연도의 태양광전원 발전량과 전력거래단가를 곱하여 산정한다. 여기서, 해당연도의 태양광전원 발전량은 식 (5)와 같이 태양광전원의 용량, 이용률, 성능저하율을 고려하여 산정한다.

$$B_{SMP}(y) = SMP(y) \cdot G_{PV}(y) \quad (4)$$

$$G_{PV}(y) = 8760 \cdot Q_{PV} \cdot U_{PV} \cdot (1 - d)^{y-1} \quad (5)$$

여기서, $B_{SMP}(y)$: 해당연도의 SMP요금(원), $SMP(y)$: 해당연도 태양광전원의 전력거래단가(원/kWh), $G_{PV}(y)$: 해당연도 태양광전원의 발전량(kWh), U_{PV} : 태양광전원의 이용률, d : 태양광전원의 성능저하율

(2) 태양광전원의 REC 요금

태양광전원의 REC(renewable energy certificate) 요금은 발전량에 비례하여 발전사업자가 받는 인센티브 요금으로서, 해당연도의 태양광전원의 발전량과 REC 단가, 가중치를 고려하여, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{REC}(y) = REC(y) \cdot WF_{REC} \cdot G_{PV}(y) \quad (6)$$

여기서, $B_{REC}(y)$: 해당연도의 REC 요금(원), $REC(y)$: 해당연도의 태양광전원의 REC 단가(원/kWh), WF_{REC} : 태양광전원의 REC 가중치

(3) 탄소배출권 요금

탄소배출권 요금은 온실가스의 절감량에 따라 정부가 기업에게 제공하는 인센티브 요금으로서, 식 (7)과 같이 해당연도의 태양광전원 발전량에 탄소배출계수와 온실가스 감축분(CER, certified emission reductions)의 단가를 곱하여 산정한다.

$$B_{CO_2}(y) = G_{PV}(y) \cdot W_{CO_2} \cdot P_{CER}(y) \quad (7)$$

여기서, $B_{CO_2}(y)$: 해당연도의 탄소배출권 요금(원), W_{CO_2} : 탄소배출계수(ton/kWh), $P_{CER}(t)$: 해당연도의 온실가스 감축분(CER) 단가(원/ton)

3.3 현재가치 환산법

경제성평가를 위한 비용과 편익은 미래에 발생하는 가치로서, 식 (8)과 같이 해당연도에 대하여 할인율을 적용하여 현재의 가치로 환산한다.

$$C_{PW} = \sum_1^n \frac{C_{flow}}{(1+r)^n} \quad (8)$$

여기서, C_{PW} : 현재가치, n : 기간, r : 할인율, C_{flow} : 해당연도의 현금흐름

4. 태양광모듈의 성능저하율을 고려한

폐기진단 알고리즘

태양광발전 발전사업자가 태양광모듈을 폐기하여 새로운 모듈로 교체하는 경우, 폐기 및 교체 판별 여부와 어느 시기에 교체하는 것이 가장 경제적인가를 판단하는 태양광모듈 폐기진단 알고리즘을 제안한다. 상세한 평가 절차는 다음과 같다.

[Step 1] 경제성평가 요소로서 평가기간, 이자율, 물가상승률 등을 상정하고, 태양광발전 사업자 측면에서 발생하는 비용요소는 태양광발전원의 건설비용과 운영비용을 고려하며, 편익요소는 SMP요금, REC요금, 탄소배출권 요금 등을 산정한다.

[Step 2] 태양광모듈의 폐기진단 여부 및 적정 폐기연도를 평가를 위하여, 태양광모듈을 폐기하지 않은 경우와 태양광모듈을 교체하는 경우에 대한 경제성평가 시나리오를 상정한다.

[Step 3] 태양광모듈을 폐기하지 않은 경우(Case I)에 대하여, 초기에 설치된 태양광모듈의 성능저하율(d_{ini})을 상정하여, 평가기간(y_{max}) 동안의 비용($C_{case I}$)과 편익($B_{case I}$)을 산정한다. 여기서, 식 (9)는 평가기간동안의 비

용함수를 나타내며, 식 (10)은 편익함수를 나타낸다.

$$C_{case I} = C_{con} + \sum_{y=1}^{y_{max}} C_{oper}(y) \quad (9)$$

$$B_{case I} = \sum_{y=1}^{y_{max}} [B_{SMP, d_{ini}}(y) + B_{REC, d_{ini}}(y) + B_{CO_2, d_{ini}}(y)] \quad (10)$$

여기서, $C_{case I}$: 태양광모듈을 교체하기 전의 비용, $B_{case I}$: 태양광모듈을 교체하기 전의 편익, d_{ini} : 태양광모듈의 성능저하율

[Step 4] 태양광모듈을 교체하지 않은 경우에 대하여, 평가기간동안 산정된 비용 및 편익을 현재가치로 환산하여, 전체 비용과 편익의 비($B/C_{case I}$)를 산출한다.

[Step 5] 태양광모듈을 교체하는 경우에 대하여, 먼저 교체하는 새로운 태양광모듈의 성능저하율(d_{ch})을 상정하고, 폐기연도(x)에 대하여 모듈 교체비용($C_{ch}(x)$)을 산정한다.

[Step 6] 태양광모듈의 폐기연도(x)를 순차적으로 증가시켜 나가면서, 평가기간(y_{max}) 동안 교체 비용을 고려한 비용($C_{case II}(x)$)과 편익($B_{case II}(x)$)을 산정한다. 여기서, 식 (11)은 평가기간동안의 교체비용을 포함한 비용함수를 나타내며, 식 (12)는 교체된 태양광모듈의 성능저하율을 고려한 편익함수를 나타낸다.

$$C_{case 2}(x) = C_{con} + \sum_{y=1}^{y_{max}} C_{oper}(y) + C_{ch}(x) \quad (11)$$

$$B_{case II}(x) = \sum_{y=1}^{x-1} [B_{SMP, d_{ini}}(y) + B_{REC, d_{ini}}(y) + B_{CO_2, d_{ini}}(y)] + \sum_{y=x}^{y_{max}} [B_{SMP, d_{ch}}(y) + B_{REC, d_{ch}}(y) + B_{CO_2, d_{ch}}(y)] \quad (12)$$

여기서, $C_{case II}(x)$: 태양광모듈을 교체한 후의 비용, $B_{case II}(x)$: 태양광모듈을 교체한 후의 편익, d_{ch} : 교체된 태양광모듈의 성능저하율

[Step 7] 태양광모듈을 교체하는 경우에 대하여, 평가기간동안 산정된 비용 및 편익을 현재가치로 환산하여, 전체 비용과 편익의 비($B/C_{case II}$)를 산출한다.

[Step 8] 태양광모듈의 폐기연도를 순차적으로 증가시켜 나가면서, 전체 비용과 편익의 비가 최대가 되는 폐기연도와 B/C Ratio를 산출한다.

[Step 9] [Step 4]의 Case I에 대한 B/C Ratio와 [Step 8]의 Case II에 대한 최대 B/C Ratio를 비교하여, 태양광모듈의 교체 여부를 판정하고, 폐기 연도를 산정한다.

상기 절차를 플로우차트로 나타내면, Fig. 2와 같다.

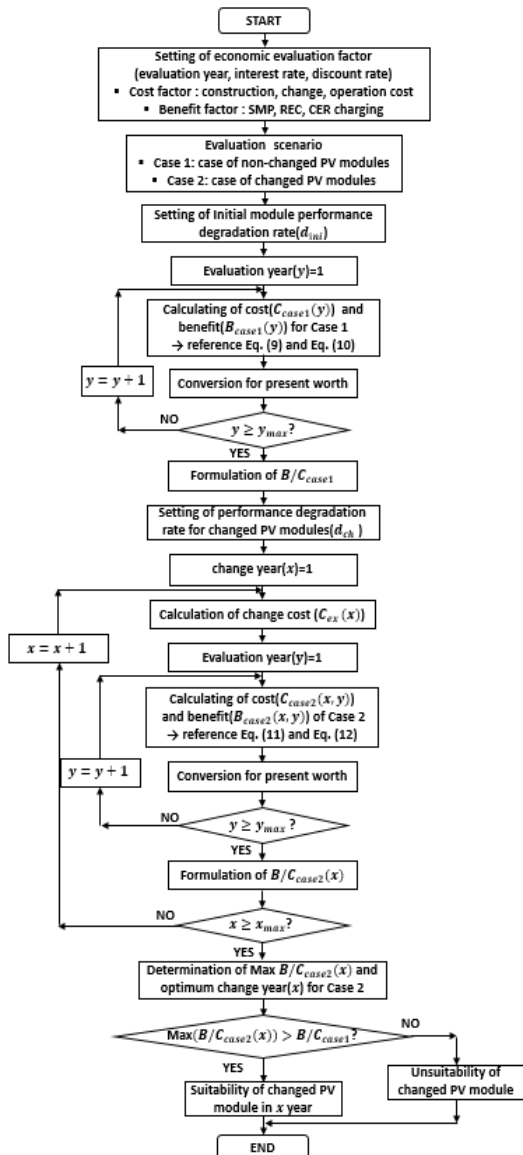


Fig. 2. Disposal diagnosis algorithm of PV modules considering degradation rate of performance

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 경제성평가 조건

제한한 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 본 논문에서는 1MW급 태양광전원을 기준으로 Table 2와 같이 경제성평가 조건을 상정한다. 여기서, 사업용 태양광전원의 건설비용, 운영비, 이용률, 할인율, 이자율, 태양광모듈의 가격하락률은 에너지경제연구원에서 공시한 “발전원별 균등화 발전원가 산정에 관한 연구(2018)”를 적용한다[10]. 또한, SMP+REC 고정가격과 탄소배출권 단가는 한국에너지공단에서 공시한 “신재생에너지공급 의무화(RPS)제도 2018년 고정가격계약 경쟁 입찰 공고”와 “국내 배출권거래제 국내이슈 가격 동향 및 향후 전망”을 적용한다[11-12]. 한편, 태양광전원의 건설비용은 은행에서 15년간 대출을 받고 원금을 매년 균등하게 상환해 나가는 원금균등 상환방식을 적용하고, 교체비용은 폐기연도로부터 경제성평가 종료 기간까지에 대하여, 원금을 균등하게 상환하는 것으로 상정한다.

Table 2. Economic evaluation conditions of 1MW scale PV systems

| parameters | contents | |
|--|---------------|-----------|
| evaluation year/year | 20 | |
| rate of operation cost[%] | 2.319 | |
| construction cost [thousand won] | direct cost | 1,091,297 |
| | indirect cost | 519,536 |
| utilization rate[%] | 15 | |
| discount rate[%] | 5.5 | |
| interest rate[%] | 3.46 | |
| fixed price of SMP+REC[won/kWh] | 186.59 | |
| cost drop rate of PV modules[%] | 4.3 | |
| CO ₂ emission factor[ton/kWh] | 0.46625 | |
| CER price[won/ton] | 19,300 | |

5.2 태양광모듈의 성능저하율을 고려한 폐기진단 경제성평가

(1) 태양광모듈을 교체하지 않은 경우(Case 1)

태양광모듈을 교체하지 않은 경우 3[%]의 성능저하율을 가진 태양광모듈에 대하여, 상기의 경제성평가 조건을 바탕으로 경제성평가기간(20년) 동안의 비용을 산정하면 Table 3과 같다. 이 표에서와 같이, 건설비용은 원금과 이자를 합하여 약 20억 5천만원, 운영비용은 약 7억 5천만원이 산출되고, 건설비용과 운영비용을 합하여 현재 가치로 환산하면, 약 19억 6천만원의 비용이 발생한다. 한편, 편익은 SMP+REC 고정가격 및 탄소배출권 단가에

따라 산정하면 Table 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, SMP+REC 요금은 약 35억원, 탄소배출권 요금은 약 1억 7천만원이고, 현재가치로 환산한 결과, 약 24억 8천만원의 총 편익이 발생함을 알 수 있다.

Table 3. Cost evaluation for PV systems without replacement of new modules

| year | cost[thousand won] | | | present value [thousand won] |
|-------|--------------------|----------|-----------|------------------------------|
| | construction | | operation | |
| | principal | interest | | |
| 1 | 107,389 | 55,735 | 37,365 | 200,489 |
| 2 | 107,389 | 52,019 | 37,365 | 186,515 |
| 3 | 107,389 | 48,304 | 37,365 | 173,453 |
| 4 | 107,389 | 44,588 | 37,365 | 161,246 |
| 5 | 107,389 | 40,872 | 37,365 | 149,840 |
| 6 | 107,389 | 37,157 | 37,365 | 139,186 |
| 7 | 107,389 | 33,441 | 37,365 | 129,235 |
| 8 | 107,389 | 29,725 | 37,365 | 119,943 |
| 9 | 107,389 | 26,010 | 37,365 | 111,269 |
| 10 | 107,389 | 22,294 | 37,365 | 103,174 |
| 11 | 107,389 | 18,578 | 37,365 | 95,620 |
| 12 | 107,389 | 14,863 | 37,365 | 88,573 |
| 13 | 107,389 | 11,147 | 37,365 | 82,001 |
| 14 | 107,389 | 7,431 | 37,365 | 75,874 |
| 15 | 107,389 | 3,716 | 37,365 | 70,162 |
| 16 | 0 | 0 | 37,365 | 16,737 |
| 17 | 0 | 0 | 37,365 | 15,864 |
| 18 | 0 | 0 | 37,365 | 15,037 |
| 19 | 0 | 0 | 37,365 | 14,253 |
| 20 | 0 | 0 | 37,365 | 13,510 |
| total | 1,610,833 | 445,880 | 747,300 | 1,961,982 |

Table 4. Benefit evaluation for PV systems without replacement of new modules

| year | benefit[thousand won] | | present value [thousand won] |
|-------|-----------------------|---------|------------------------------|
| | SMP+REC | CER | |
| 1 | 245,179 | 11,824 | 257,003 |
| 2 | 237,824 | 11,469 | 236,297 |
| 3 | 230,469 | 11,115 | 217,051 |
| 4 | 223,113 | 10,760 | 199,170 |
| 5 | 215,758 | 10,405 | 182,563 |
| 6 | 208,402 | 10,051 | 167,146 |
| 7 | 201,047 | 9,696 | 152,840 |
| 8 | 193,692 | 9,341 | 139,572 |
| 9 | 186,336 | 8,986 | 127,272 |
| 10 | 178,981 | 8,632 | 115,875 |
| 11 | 171,625 | 8,277 | 105,320 |
| 12 | 164,270 | 7,922 | 95,551 |
| 13 | 156,915 | 7,568 | 86,515 |
| 14 | 149,559 | 7,213 | 78,160 |
| 15 | 142,204 | 6,858 | 70,442 |
| 16 | 134,849 | 6,503 | 63,316 |
| 17 | 127,493 | 6,149 | 56,742 |
| 18 | 120,138 | 5,794 | 50,681 |
| 19 | 112,783 | 5,439 | 45,098 |
| 20 | 105,427 | 5,084 | 39,959 |
| total | 3,506,064 | 169,086 | 2,486,573 |

Table 3과 Table 4의 산정내역을 바탕으로 연도별 비용과 편익을 나타내면 Fig. 3과 같다. 여기서, Fig. 3의 ㉑는 평가기간 중에 발생하는 비용으로서, 설치한 후 15년도 이후에 급격히 하락하는데, 이것은 차입금 상환이 완료되고 운영비만 발생하기 때문이다. 한편, Fig. 3의 ㉒는 평가기간 중에 발생하는 편익으로서, 연간 평균 3[%]씩 감소되는 태양광모듈의 성능저하율로 인하여, 태양광 전원의 연간 발전량이 감소되어, 매년 발생하는 편익이 급격하게 하락함을 알 수 있다.

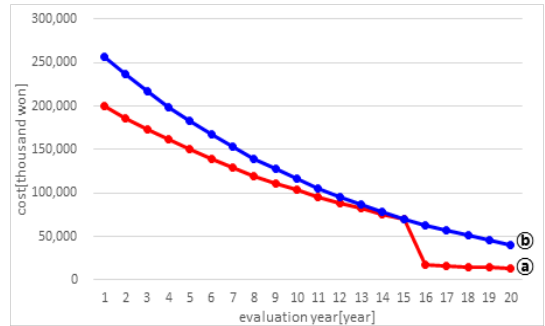


Fig. 3. Yearly cost and benefit evaluation for PV systems without replacement of new modules

(2) 태양광모듈의 성능저하율을 고려한 폐기진단 경제성평가(Case II)

예를 들어 태양광모듈을 설치한 후 10년째에 폐기, 교체하는 경우, 교체 전과 후의 태양광모듈의 성능저하율은 각각 3[%], 1[%]로 가정하여 평가기간에 대하여 총 비용과 편익을 산정하면 Table 5와 Table 6과 같다. 여기서, Table 5는 태양광모듈을 10년째에 교체한 경우의 비용 산정내역을 나타내며, Table 5는 동일한 경우에 대한 편익 산정내역이다. Table 5에서와 같이, 건설비용은 약 20억 5천만원, 교체비용은 태양광모듈의 비용만을 고려하면 직접비의 56.9[%]이며, 설치기준 연도로부터 해당 연도까지의 할인율을 적용하여 원금과 이자를 산출하면 약 5억원이다[10]. 또한, 운영비용은 약 7억 5천만원으로 산출되며, 전체 비용을 현재가치로 환산하면 약 22억 6천만원이 산출된다. 한편, Table 6에서와 같이, SMP+REC 요금은 약 45억원, 탄소배출권 요금은 약 2억 1천만원이고, 전체 편익을 현재가치로 환산하면, 약 29억 7천만원이 산정됨을 알 수 있다.

Table 5. Cost evaluation for PV systems with replacement of new modules

| year | cost[thousand won] | | | present value [thousand won] |
|------|--------------------|-------------|-----------|------------------------------|
| | construction | replacement | operation | |
| 20 | 2,056,712 | 504,877 | 747,300 | 2,207,696 |

Table 6. Benefit evaluation for PV systems with replacement of new modules

| year | benefit[thousand won] | | present value [thousand won] |
|------|-----------------------|---------|------------------------------|
| | SMP+REC | CER | |
| 20 | 4,503,943 | 217,210 | 2,973,570 |

상기의 산정내역을 바탕으로 태양광모듈을 교체한 경우에 대하여, 연도별 비용과 편익을 나타내면 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 ㉑는 평가기간 중에 발생하는 비용으로서, 10년째에 급격히 상승하는 것은 태양광모듈의 교체 비용이 발생하기 때문이고, 15년도 이후에 급격히 하락하는 것은 초기 투자비에 대하여 차입금 상환이 완료되고, 운영비와 교체된 모듈의 비용 상환만이 발생하기 때문이다. 한편, Fig. 4의 ㉒는 평가기간 중에 발생하는 연도별 편익이며, 10년째에 급격히 상승하는 것은 성능저하율(1%)이 향상된 태양광모듈로 교체되어, 태양광전원의 발전량 증가에 의한 편익이 상승하기 때문이다. 즉, 기존의 방법과 같이, 태양광모듈을 교체하지 않고 운영하는 경우에는 약 5억 2천만원의 순이익이 발생하지만, 본 논문에서와 같이, 성능이 향상된 태양광모듈로 교체하는 경우에는 교체비용을 고려하더라도 기존보다 훨씬 많은 약 7억 6천만원의 순이익이 발생함을 알 수 있다.

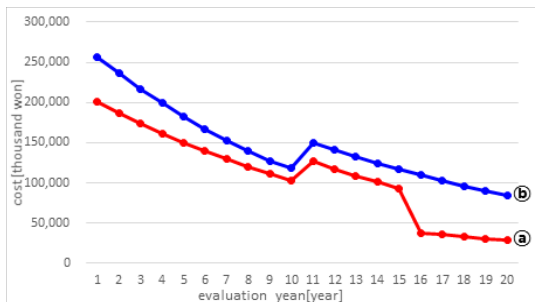


Fig. 4. Yearly cost and benefit evaluation for PV systems with replacement of new modules

(3) 종합 비교분석

태양광모듈의 성능저하율을 고려하여 태양광모듈의 교체에 따른 비용에 대한 편익비율(B/C Ratio, Benefit-Cost ratio)은 Table 7과 Table 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Table 7은 태양광모듈을 교체하지 않은 경우에 대하여 성능저하율을 1%, 3%, 5%의 파라메타로 상정하여 B/C Ratio를 나타낸 것이고, Table 8은 태양광모듈을 교체한 경우에 대하여 성능저하율을 1%, 2%, 3%로 가정하여, B/C Ratio를 나타낸 것이다. Table 7에서와 같이, 성능저하율이 각각 1%, 3%, 5%인 경우에 대한 B/C ratio를 산정하면 각각 1.523, 1.268, 1.011인데, 즉 성능저하율이 나빠질수록 B/C ratio가 감소함을 알 수 있다. 한편, Table 8의 음영으로 표시된 부분은 교체하지 않은 경우의 B/C ratio보다 큰 경우이며, 태양광모듈을 교체하는 것이 더욱 경제적인 것을 나타낸 것이다. 따라서, 태양광모듈의 성능저하율을 고려한 폐기 및 교체 판별 여부와 경제적인 교체시기를 판단할 수 있어, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있다.

Table 7. B/C ratio for performance degradation rate without replacement of PV modules

| performance degradation rate | 1[%] | 3[%] | 5[%] |
|------------------------------|-------|-------|-------|
| B/C ratio | 1.523 | 1.268 | 1.011 |

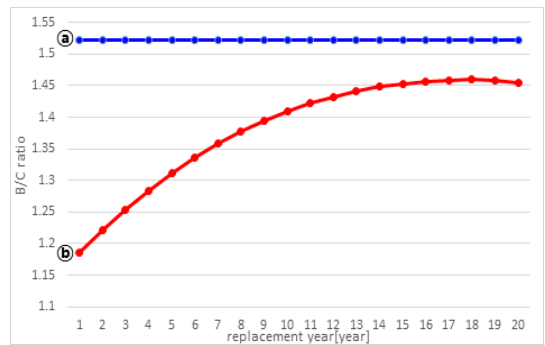
Table 8. Yearly B/C ratio for performance degradation rate with replacement of PV modules

| year | B/C ratio | | | | |
|------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1-1[%] | 3-1[%] | 3-2[%] | 5-1[%] | 5-3[%] |
| 1 | 1.186 | 1.186 | 1.086 | 1.186 | 0.988 |
| 2 | 1.221 | 1.221 | 1.132 | 1.221 | 1.043 |
| 3 | 1.254 | 1.253 | 1.172 | 1.250 | 1.09 |
| 4 | 1.284 | 1.278 | 1.208 | 1.273 | 1.132 |
| 5 | 1.311 | 1.300 | 1.238 | 1.288 | 1.164 |
| 6 | 1.336 | 1.317 | 1.263 | 1.298 | 1.194 |
| 7 | 1.358 | 1.330 | 1.283 | 1.302 | 1.209 |
| 8 | 1.377 | 1.339 | 1.300 | 1.301 | 1.222 |
| 9 | 1.394 | 1.345 | 1.311 | 1.295 | 1.229 |
| 10 | 1.409 | 1.347 | 1.319 | 1.285 | 1.230 |
| 11 | 1.422 | 1.346 | 1.324 | 1.270 | 1.225 |
| 12 | 1.432 | 1.342 | 1.325 | 1.251 | 1.215 |
| 13 | 1.441 | 1.335 | 1.322 | 1.229 | 1.202 |
| 14 | 1.448 | 1.326 | 1.317 | 1.204 | 1.184 |
| 15 | 1.453 | 1.314 | 1.308 | 1.176 | 1.160 |
| 16 | 1.456 | 1.302 | 1.297 | 1.146 | 1.136 |
| 17 | 1.458 | 1.287 | 1.284 | 1.113 | 1.107 |
| 18 | 1.460 | 1.270 | 1.267 | 1.078 | 1.076 |
| 19 | 1.459 | 1.251 | 1.251 | 1.042 | 1.041 |
| 20 | 1.454 | 1.229 | 1.212 | 1.002 | 1.002 |

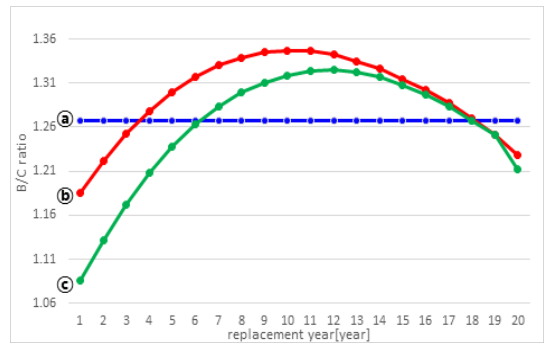
* a-b [%] : 기존모듈의 성능저하율 - 교체모듈의 성능저하율

Table 8을 바탕으로 각 성능저하율(1[%], 3[%], 5[%])에 따라 폐기연도 별 B/C ratio를 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)의 ㉔와 ㉕는 성능저하율이 1[%]인 경우, 태양광모듈을 교체하지 않는 경우와 교체한 경우의 B/C ratio를 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 모든 폐기연도에 대하여, 태양광모듈을 교체한 경우의 B/C ratio가 교체하지 않은 경우보다 작으므로 교체하지 않고 운영하는 것이 경제적인임을 알 수 있다. 한편, Fig. 5(b)는 교체하기 전의 태양광모듈의 성능저하율은 3[%]이고, 교체한 경우의 성능저하율은 각각 1[%], 2[%]인 경우의 폐기연도 별 B/C ratio를 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 5(b)의 ㉔는 태양광모듈을 교체하지 않은 경우의 B/C ratio고, Fig. 5(b)의 ㉕와 ㉖는 교체된 모듈의 성능저하율이 각 1[%], 2[%]인 경우에 대한 B/C ratio를 나타낸 것이다. Fig. 5(b)의 ㉕과 같이, 설치기준 연도에서부터 4년째~18년째 사이에 폐기하여 교체하면 경제성이 확보되며, 이 중에서 10년째에 태양광모듈을 교체하는 것이 가장 큰 값(1.347)의 B/C ratio를 가지므로 최적의 경제적인 교체연도임을 알 수 있다. 또한, Fig. 5(b)의 ㉖과 같이, 2[%]의 성능저하율을 가진 태양광모듈로 교체하는 경우, 7년째~17년째 사이의 폐기연도에서 경제성이 확보되며, 12년째에 태양광모듈을 교체하는 것이 가장 큰 값(1.325)의 B/C ratio를 가지므로 최적의 교체연도임을 알 수 있다.

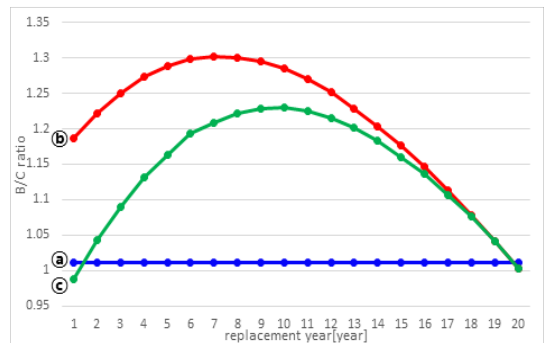
한편, Fig. 5(c)는 교체하기 전의 태양광모듈의 성능저하율은 5[%]이고, 교체한 경우의 성능저하율은 각각 1[%], 3[%]인 경우의 폐기연도 별 B/C ratio를 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 5(c)의 ㉔는 태양광모듈을 교체하지 않은 경우의 B/C ratio고, Fig. 5(c)의 ㉕와 ㉖는 교체된 모듈의 성능저하율이 각 1[%], 3[%]인 경우에 대한 B/C ratio를 나타낸 것이다. Fig. 5(c)의 ㉕과 같이, 설치기준 연도에서부터 1년째~19년째 사이에 폐기하여 교체하면 경제성이 확보되며, 이 중에서 7년째에 태양광모듈을 교체하는 것이 가장 큰 값(1.302)의 B/C ratio를 가지므로 최적의 경제적인 교체연도임을 알 수 있다. 또한, Fig. 5(c)의 ㉖과 같이, 3[%]의 성능저하율을 가진 태양광모듈로 교체하는 경우, 2년째~19년째 사이의 폐기연도에서 경제성이 확보되며, 10년째에 태양광모듈을 교체하는 것이 가장 큰 값(1.230)의 B/C ratio를 가지므로 최적의 교체연도임을 알 수 있다.



(a) 1[%] of performance degradation rate for existing PV modules



(b) 3[%] of performance degradation rate for existing PV modules



(c) 5[%] of performance degradation rate for existing PV modules

Fig. 5. Characteristics of B/C ratio for performance degradation rate of PV modules based on replacement year

6. 결론

본 논문에서는 폐기하는 태양광모듈의 정확한 교체판별 여부 및 교체시기를 평가하기 위하여, 태양광모듈의 성능저하율을 고려한 경제성평가 모델링을 제시하고, 폐기진단 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 태양광모듈을 교체하지 않은 경우에 대하여 경제성을 평가한 결과, 성능저하율이 각각 1%, 3%, 5%인 경우에 대하여 B/C ratio를 산정하면, 각각 1.523, 1.268, 1.011인데, 즉 성능저하율이 나빠질수록 B/C ratio가 감소함을 알 수 있다.

(2) 태양광모듈을 교체하지 않는 경우와 교체한 경우의 태양광모듈의 성능저하율이 동일하면, 모든 폐기연도에 대하여, 태양광모듈을 교체한 경우의 B/C ratio가 교체하지 않은 경우보다 작으므로 교체하지 않고 운용하는 것이 경제적임을 알 수 있다.

(3) 교체하기 전의 태양광모듈의 성능저하율은 3%이고, 교체한 경우의 성능저하율은 1%인 경우, 설치기준 연도에서부터 4년째~18년째 사이에 폐기하여 교체하면 경제성이 확보되며, 이 중에서 10년째에 태양광모듈을 교체하는 것이 가장 큰 값(1.347)의 B/C ratio를 가지므로 최적의 경제적인 교체연도임을 알 수 있다. 또한, 2%의 성능저하율을 가진 태양광모듈로 교체하는 경우, 7년째~17년째 사이의 폐기연도에서 경제성이 확보되며, 12년째에 태양광모듈을 교체하는 것이 가장 큰 값(1.325)의 B/C ratio를 가지므로 최적의 교체연도임을 알 수 있다.

(4) 태양광모듈의 성능저하율에 따라 폐기, 교체 판별 여부와 최적의 폐기연도를 판단할 수 있어, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있었다.

References

- [1] A.R .Gxasheka, "Evaluation of performance parameters of PV modules deployed outdoors," *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 611-620.
- [2] E.D. Dunlop, "Lifetime performance of crystalline silicon PV module," 3rd World conference on photovoltaic energy conversion, pp. 2927-2930, 2003.
- [3] S. J Ku, S. H Yoon, "Willingness to pay for renewable energy investment in Korea: A choice experiment study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 8, pp. 2196-2201, 2010
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.013>
- [4] Ministry of Trade, Industry and Energy, *Renewable Energy 3020Plan*, <https://www.gov.kr/portal/ntnadm/News/1279625>, 2017
- [5] S.J Lee, S.W Cho, J.M Choi, "A Study on Photovoltaic

Efficiency and Economics at the University", *The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea*, pp595-598, 2012

- [6] S. J Ku, S. H Yoon, "The Electrical Characteristics of The Modules According to The Environment of The Floating Photovoltaic System", *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 31, No.5, pp. 283-289 2018
DOI: <http://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.5.283>
- [7] S.S Choi, H. T Kim, J.B Park, B.K Kim, D.S Rho, "Development of State Diagnosis Algorithm for Performance Improvement of PV System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 2, pp. 1036-1043, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.2.1036>
- [8] K.H Lee, S.S Choi, B.K Kim, C.H Kim, D.S Rho, "Development of Aging Diagnosis Algorithm for Photovoltaic Modules by Considering Electric Characteristics and Environment Factors", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 64, No. 10, pp. 1411 ~ 1417, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.10.1411>
- [9] C. H Yoo, I. Y Chung, S. S Hong, B. J Jang, "Rule-based Coordination Algorithms for Improving Energy Efficiency of PV-Battery Hybrid System", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* Vol. 61, No. 12, pp. 1791-1800, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.12.1791>
- [10] K. T Lee, *A Study on Estimation of Equalization of Generation Costs*, Korea energy economics institute, Korea, 2018.
- [11] *Renewable Energy Supply Mandate (RPS) Scheme 2018 Competitive Bidding Announcement of Fixed Price Contract*, Korea energy agency, Korea, 2018.
- [12] *Domestic Emission Trading Domestic Issues Price Trends and Future Outlook*, Korea energy agency, Korea, 2018.

박 지 현(Ji-Hyun Park)

[정회원]



- 2017년 2월 : 청주대학교 태양광 에너지공학과 (공학사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

신재생에너지, 전력계통, 마이크로그리드

이 후 동(Hu-Dong Lee)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드, 보호협조

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석

태 동 현(Dong-Hyun Tae)

[정회원]



- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

페레이라 마리토(Marito Ferreira)

[정회원]



- 2013년 2월 : 동티모르 국립대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력품질 해석, 분산전원, 전기저장장치