

제로에너지건물 구축을 위한 PV + ESS 액티브 시스템의 최적운영개발에 관한 연구

우성민* · 문진철** · 안중욱*** · 김용하****

*충북테크노파크 차세대에너지센터, 선임연구원
**충북테크노파크 차세대에너지센터, 책임연구원
***가천대학교 에너지IT학과, 책임연구원
****인천대학교 전기공학과, 교수

The Study of Optimal Operation Development of PV + ESS Active System for Zero Energy Building

Woo Sung-Min* · Moon Jin-Chel** · Ahn Jong-Wook*** · Kim Yong-Ha****

*Senior Researcher, Next Generation Energy Center, Chungbuk Technopark
**Head Researcher, Next Generation Energy Center, Chungbuk Technopark
***Head Researcher, Department of Energy IT Engineering, Gachon University
****Professor, Department of Electricity Engineering, Incheon National University

†Corresponding author: yhkimsjb@naver.com

Abstract

This paper in order to efficiently operate zero energy buildings developed a methodology for optimal operation of PV + ESS active systems. This program consists of three steps. First step is PV optimal operation and second step is PV + ESS optimal operation. Third step is the analysis of the results by PV + ESS optimal operation. The optimal operation of PV + ESS was calculated by using Dynamic Programming (DP). Therefore, the optimal capacity and operating plan of PV + ESS in this study are calculated for electric load at building. This paper conducted case study to verify the validity of the developed algorithm. Also, the sensitivity analysis analyzed the effect of each variable on the optimal operation.

Keywords: 제로에너지빌딩(Zero Energy Building), 에너지저장시스템(Energy Storage System), 태양광발전(Photovoltaic), 최적운영(Optimal operation), 동적계획법(Dynamic Programming)

1. 서론

정부에서는 온실가스 감축 강화를 위해 2020년 공공부문에 대하여 제로에너지건축물 인증이 의무화할 예정이다¹⁾. 이를 통하여 ZEB 산업시장을 육성하고, ZEB 조기활성화를 위하여 다양한 정부정책이 제안되고 있다. 현재 ZEB에 신재생에너지 시설을 설치하면 설치비의 최대 50%의 보조금을 제공하고, 용적률에 대한 인센티브를 지원하고 있다. 또한, 기존 건물의 에너지 최적화 기술과 더불어 활성화를 위한 평가기준 개발, 관련 정책 개발에 투자되고 있으며 요소기술별 기술개발과 그린 리모델링 사업이 추진 중이다²⁾.



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.39, No.5, pp.53-63, October 2019
<https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.5.053>

pISSN : 1598-6411
eISSN : 2508-3562

Received: 27 September 2019

Revised: 23 October 2019

Accepted: 28 October 2019

Copyright © Korean Solar Energy Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

그러나, ZEB 보급·활성화를 견인할 수 있는 특성화 표준 뿐만 아니라 통합설계 및 협업 엔지니어링이 부재하며, 제로에너지 공급비용 및 운영성능에 대한 검증 솔루션이 부족한 실정이다. 이에 제로에너지빌딩에서도 다양한 재생에너지를 사용하나 에너지에 대한 효율적 관리를 위하여 에너지저장시스템(ESS ; Energy Storage System)이 주목받고 있으며, 태양광 발전(PV ; Photovoltaic)과 연계하여 수요관리 개선과 경제성을 확보하여 보급을 시키고 있는 추세이다.

해외에서는 이러한 불안정한 전력문제를 해결하기 위해 노력하고 있으며, 일본에서는 ESS 도입용량의 1/3 정도의 지원프로그램으로 보조금을 지급하고 있다. 미국의 경우도 ESS 설치의무화를 통해 피크의 5[%]를 담당하는 사업을 추진 중에 있다³⁾. 이에 우리나라에서도 신재생에너지 연계용 ESS의 경우에는 신재생에너지공급인정서(REC ; Renewable Energy Certificate)에 대한 가중치를 부여함으로써 ESS 상용화에 적극적으로 대처하고 있다⁴⁾. 물론 최근 ESS 화재로 문제가 불거졌으나, 화재원인 및 대책발표로 다시 보급활성화가 기대된다⁵⁾.

PV + ESS 최적운영의 경우는 기존에 설치된 실사례를 위주로 분석한 경우와 HOMER와 같은 기존 소프트웨어로부터, 최적운영에 대한 분석을 하고 있으나, 전자의 경우는 운영에 대한 신뢰성은 높으나, 분석의 한계점이 있고, 후자의 경우는 설비조합에 의한 시뮬레이션을 정적으로 분석한다는 점에서 제한적인 부분이 많다⁶⁻⁹⁾. 또한, 해외에서 만든 프로그램이기 때문에 국내환경에 반영시 데이터를 일부 가공해야 하는 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 국내환경을 반영하여 PV + ESS의를 최적으로 운용할 수 있도록 동적상태를 고려한 프로그램을 개발하였다. 이를 통해서 적정 설비용량 및 운용방안을 검토하였으며, 민감도 분석을 통해 각 변수에 미치는 영향을 분석하였다.

2. PV + ESS 최적운용 방법론

본 연구에서 개발한 PV 와 ESS의 융복합 운용시 최적으로 운용하기 위해 동적계획법(DP ; Dynamic Programming)을 이용하여 1단계 PV 최적화, 2단계 PV + ESS 최적화, 3단계 최적운용에 의한 결과의 분석으로 구성하였다.

2.1 PV 최적화

PV의 최적운전의 목적함수는 전기요금 최소화로 PV에서 생산된 전력 중 얼마를 수용가가 자가소비하고 어느 정도를 역송하는 것이 전기요금 최소가 되는지 Fig. 1과 같이 계산하였다.

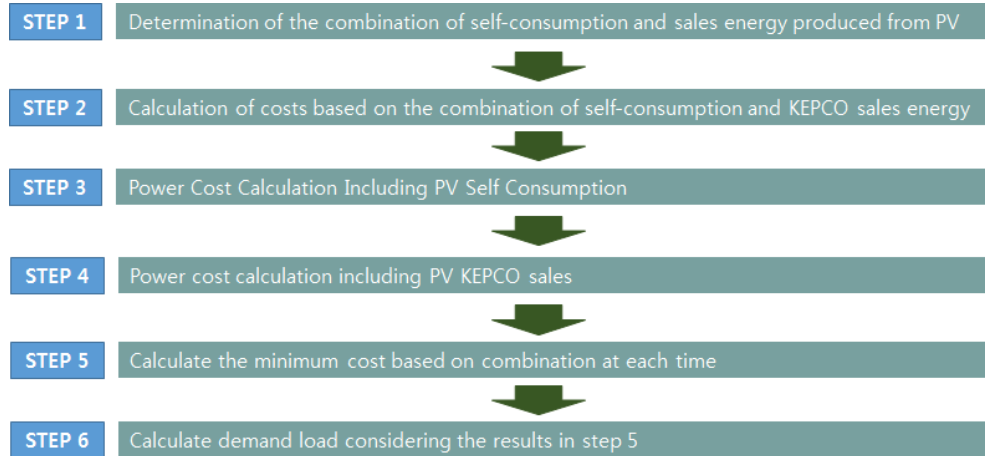


Fig. 1 Flow chart for PV optimal operation

우선, PV최적 구성을 위해 동적계획법(이하 DP)의 Stage는 시간[h]으로 하였으며, State는 전기용량[kW]으로 구성하였다.

1단계에서는 각 시간대에서 PV 생산전력의 자가소비량과 판매량의 가능조합을 계산하기 위해 조합의 개수를 $\frac{PV\text{시간대별 생산전력}}{PV\text{출력의 DP시플레이션간격}} + 1$ 로 구성하고, 각 시간대에서 PV 생산전력의 자가소비량과 판매량의 가능조합의 개수를 도출하였다.

2단계에서는 각 조합별로 PV 생산전력의 자가소비량[kWh] 및 역송량[kWh]의 조합에 따른 역송비용[천원]을 식(1)과 같이 계산하였다. Fig. 2는 부하크기의 조합별로 PV자가소비량[kWh] 및 역송량[kWh]의 크기를 산정한다.

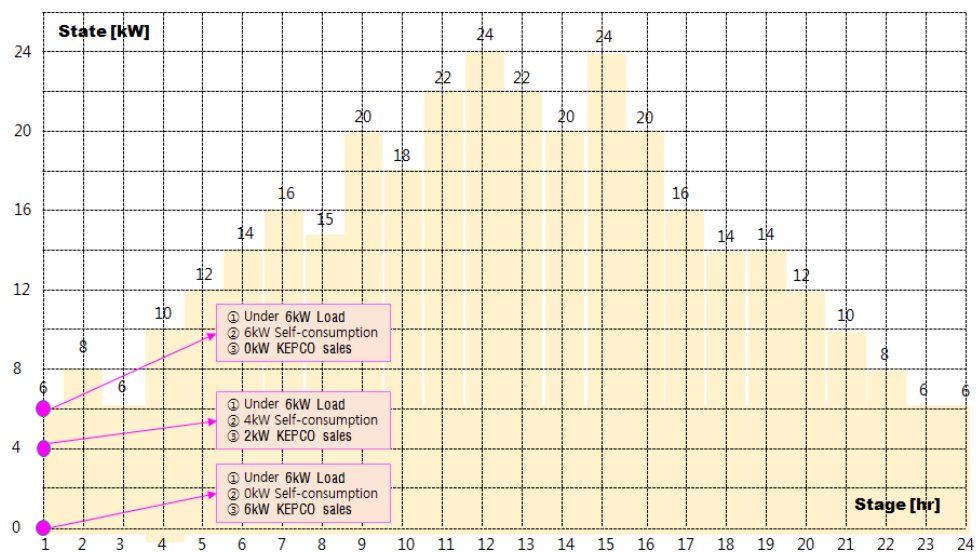


Fig. 2 Load variation curve by PV operating combination

$$PVRSC = REP[SMP + (REC가중치 \times REC단가 \times 1000)] \quad (1)$$

단, $PVRSC$: PV 역송비용 [천원]

REP : 역송량 [kWh]

SMP : 계통한계가격 (SMP; System Marginal Price) [천원/kWh]

REC 단가: 신재생에너지공급인증서 가격 [천원/MWh]

3단계에서는 2단계에서 계산된 역송비용[천원]을 제외하고, 조합별 PV 자가소비에 따른 전기요금[천원]을 식(2)와 같이 계산하였다.

$$PVEDC = (PSD - PVES) \times EDC \quad (2)$$

단, $PVEDC$: 현재시간까지 계산된 누적수익 [천원]

PSD : 수용가 소비전력량 [kWh]

$PVES$: PV 생산전력 자가소비량 [kWh]

EDC : 수용가 소비전력시의 전기요금 [천원]

따라서 4단계에서는 3단계에서 계산된 금액에서 2단계에서 계산된 역송비용[천원]을 제외하여 총 소요되는 전기요금[천원]을 각 조합별로 계산하고, 각 시간대별 전기요금[천원]을 순서대로 나열하고 전기요금이 최소가 되는 시점을 도출하였다.

2.2 PV + ESS 최적화

2.1절에서 PV의 자가소비량[kWh]이 결정되면 결국은 수용가의 전기부하가 결정되며 Fig. 3과 같이 이 상태에서 ESS의 최적운전을 결정하게 되면 DP로 부터 PV와 ESS를 고려한 최적운전을 결정할 수 있게 된다.

1단계에서는 ESS 최적운전 결정을 위한 DP 초기조건을 설정하였다. STATE의 개수는 ESS용량[kWh]/ ESS 충전 RATE[kWh/hr]로 산정하고, ESS 충전 RATE[kWh/hr]을 DP의 격자점 간격으로 하였다.

2단계에서는 ESS 시단(STAGE #1)을 고정하고, 시단 State 제외한 모든 State의 비용을 big 값으로 설정하여 최적 경로에서 배제하여, DP 계산시 시간을 효율적으로 도출하도록 하였다¹⁰⁾.

3단계에서는 각 시간대 t=1의 전력사용량(1,S)로부터 시간대 t=2의 상태인(2,S)로 천이하는데 변동하는 전력부하로부터 ESS의 충방전 상태를 도출하였다. 이때, ESS 운용이 불가능한 State에 비용을 BIG값을 주어 Feasible region을 제거하여 계산효율을 향상시켰다. Fig. 4는 ESS운용 영역을 계산한 것으로 예를들면, ESS 초

기수위가 6[kW], 충·방전 Rate가 2[kW](에너지충·방전 1[kW]간격), 전체용량이 12[kW]인 경우를 예로 하였으며, 각 상태 천이별로 ESS 충·방전 상태를 볼 수 있다.

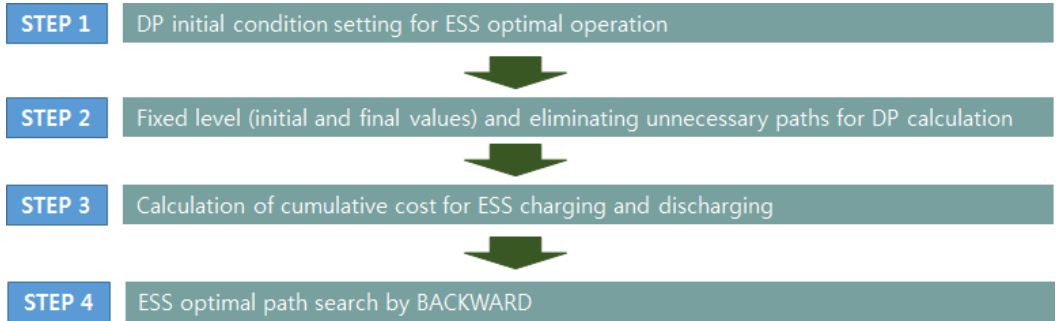


Fig. 3 Flow chart for PV + ESS optimal operation

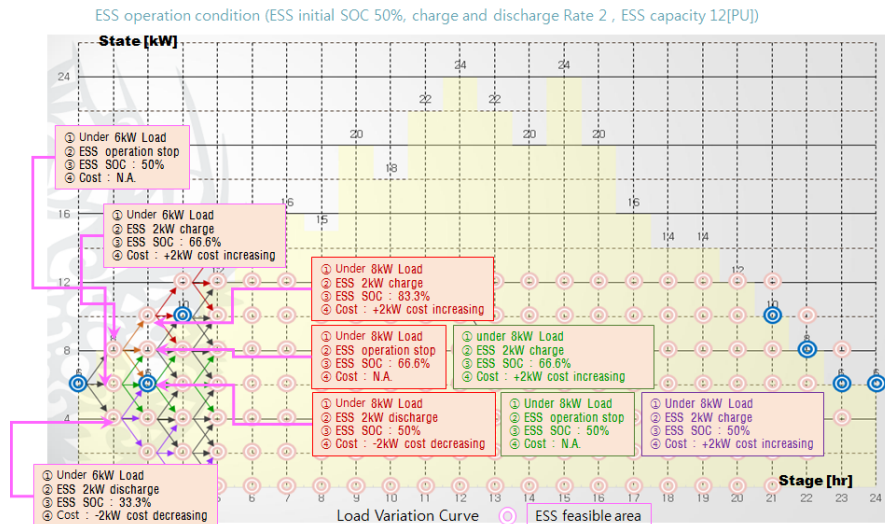


Fig. 4 ESS operation by charge and discharge considering state and stage

4단계에서는 부분최적이 아닌 전체적인 ESS 최적운영 경로를 탐색하기 위하여(1,S)로에서 각 State별로 천이되는 수익을 계산하여 식(3)과 같이 최종 시점(t=N)까지 ESS에 대한 각 수익을 계산하였다. 따라서 Fig. 5와 같이 최종적으로 계산된 수익경로 중 수익최대화인 경로를 Backward로 탐색하여 가장 경제적인 경로를 도출하였다.

$$TR(K, J) = DC(I, J) + DPC(I-1, K) \tag{3}$$

단, TR : 현재시간까지 계산된 누적수익 [천원]

DC : 현재시간 Stage의 State에서 계산된 수익 [천원]

DPC : 전 시간 Stage의 State까지 계산된 누적최대수익 [천원]

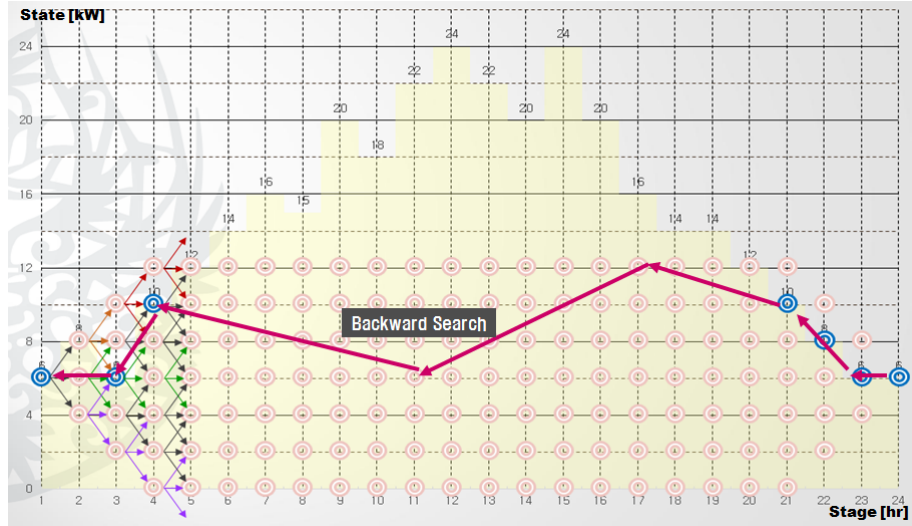


Fig. 5 The optimal path search

2.3 최적운영 결과의 분석

2.2절에서 도출된 최적운영 결과는 Fig. 6과 같이 PV +ESS 최적운영분석으로는 ① 최적 PV 운용량, ② 최적 ESS 운용량이 계산된다. 또한, 편익으로는 ① 최적 PV 운용시 전기요금 절감, ② 최적 PV+ESS 운용시 전기요금 절감, ③ 투자회수기간이 산정된다.

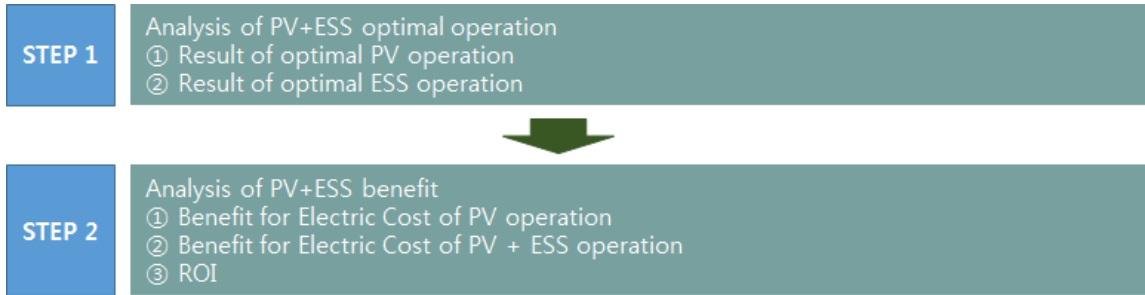


Fig. 6 Analysis of Results by PV + ESS Optimal Operation

3. 사례연구

본 연구에서는 Fig. 7과 같이 A수용가의 계절별인 봄(4월), 여름(7월), 가을(10월), 겨울(1월)의 대표부하 대하여 주간 168시간 단위로 결과를 분석하였다. 월의 주간대표부하는 해당월 4주의 각 요일마다의 시간대별 부하의 평균부하[kW]를 구하여 사용하였다.

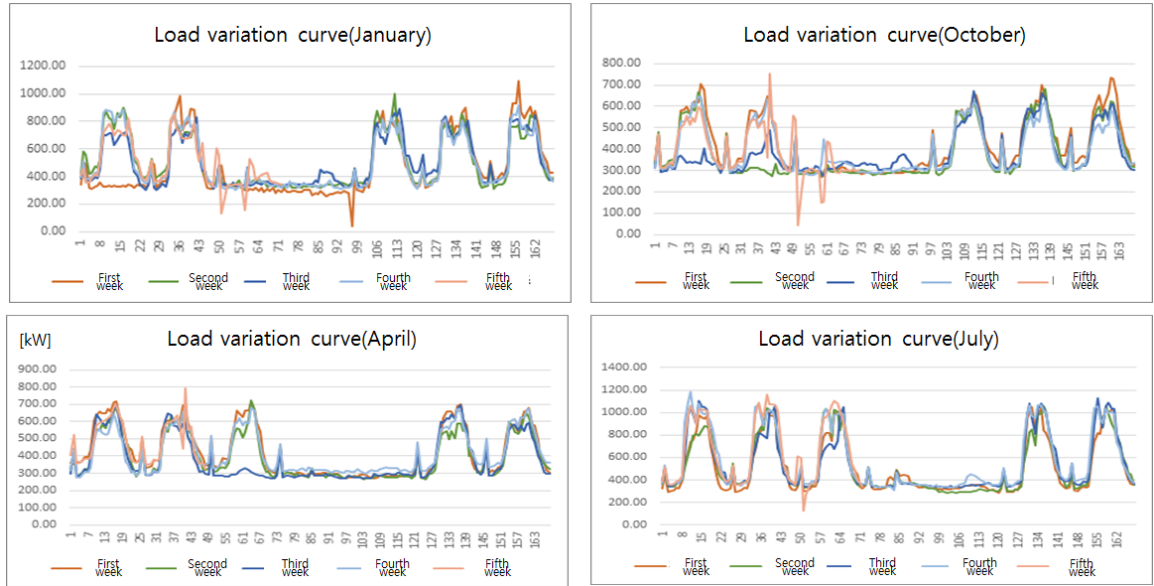


Fig. 7 Power load variation curve of case study

본 연구에는 PV + ESS의 운용에 필요한 Data로서의 입력 데이터를 Tables 1, 2, 3과 같이 구성하였다.

Table 1 PV input data

Category	Input data
PV capacity [kW]	350.0
PV construction cost per kW [Won/kW]	2,000,000
Unit price per REC [Won/REC]	90,000
REC weight [PU]	5.0
Factor of PV output [PU]	1.0
Simulation unit of PV output [kW]	1.0
Factor of PV construction cost [PU]	1.0

Table 2 ESS input data (1)

Category	Input data
ESS capacity [kWh]	600
Charge rate [kWh/hr]	50
Discharge rate [kWh/hr]	50
PCS capacity [kW]	250
ESS unit cost per kWh [Won/kWh]	600,000
Factor of ESS installed cost [PU]	1.0

Table 3 ESS input data (2)

NO	Ramp rate [kWh]	Charge efficiency [PU]	Dis-charge efficiency [PU]
1	200	0.98	0.93
2	300	0.96	0.95
3	600	0.92	0.97

3.1 부하특성 분석

Fig. 8과 같이 부하특성은 여름의 부하가 가장 크며, 다음으로 겨울의 부하이므로 봄, 가을의 부하특성은 유사함을 알 수 있다. 즉 부하크기의 측면에서 부하가 큰 순은 여름 > 겨울 > 봄, 가을의 순서이다. 이러한 현상은 여름철의 냉방부하, 겨울철의 난방부하를 사용하기 때문인 것으로 판단된다.

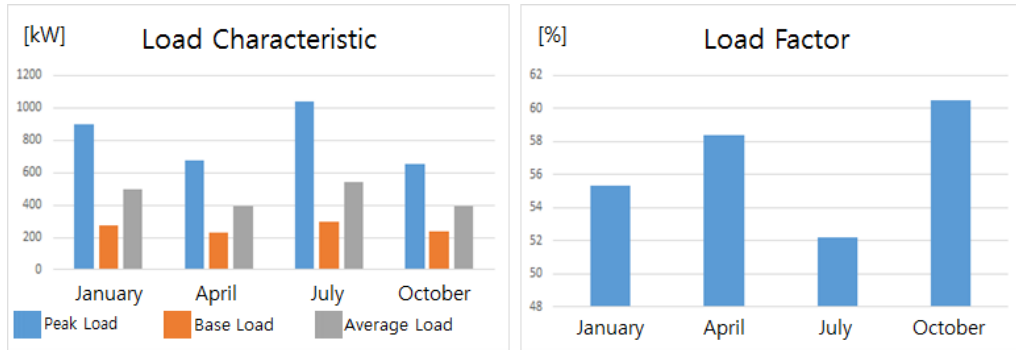


Fig. 8 The result analysis of demand by season

3.2 최적운영 분석

3절의 입력자료로 부터 각 계절별 부하에 PV + ESS의 최적운영에 의한 결과는 Fig. 9에 나타내었다.

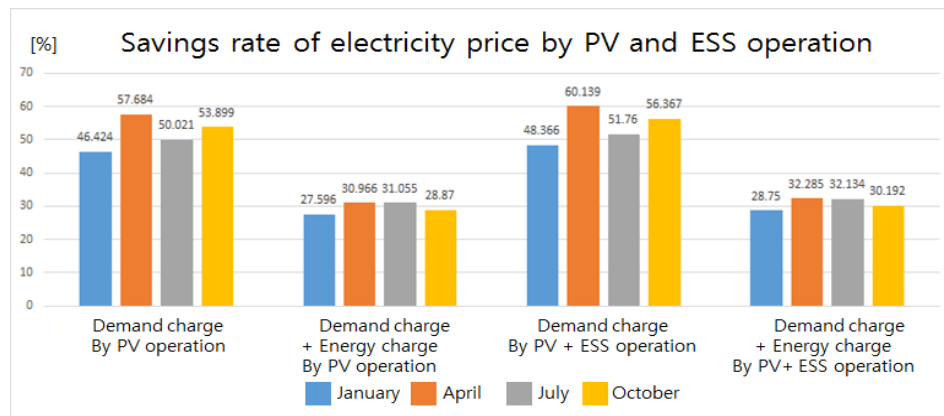


Fig. 9 Saving rate of electric cost of PV + ESS optimal operation by season

Fig. 9와 같이 PV 운용시에 비하여 PV+ESS 운용시 전기요금 절감율이 큰 것으로 도출되었다. 즉, PV만 단독으로 운용하는 것에 비하여 PV와 ESS를 융복합하여 운용하면 전기요금은 1월 4.18[%], 4월 4.26%, 7월 3.47[%]에서 12월 4.58[%]로 절감율이 도출되는 것으로 분석되었다. 부하크기의 측면에서 부하가 큰 순은 여름, 겨울이 봄, 가을보다 크며, 부하의 양호한 정도(부하율)로는 봄, 가을이 여름, 겨울보다 양호하다. 기본요금 측면에서는 계약전력에 의해 결정되므로 PV+ESS의 운용효과는 전력량요금을 기준으로 해석하는 것이 더욱 명확하다. PV + ESS운용시 전력량요금 절감효과는 봄, 가을이 여름, 겨울보다 큰 것으로 산정되었다. 이는 부하의 크기보다는 부하율에 따라 PV + ESS의 최적운영 결과가 더 크게 영향을 받고 있음을 의미한다.

3.3 민감도 분석

PV+ESS의 운용에 영향을 미치는 Parameter에 대한 감도해석(Sensitivity Analysis)을 수행하여 향후 PV + ESS운용에 대한 유효한 정책적인 대책을 수립하기 위한 기초적인 정보를 제공하도록 하였다.

감도해석의 대상은 ① 전기요금의 변화, ② PV 설치단가의 변화, ③ REC 가격의 변화, ④ ESS 설치단가를 변화시켜 전기요금 절감율과 투자회수기간에 미치는 요인을 분석하였다. 모든 금액의 변화는 현재의 금액을 기준으로 ± 5 [%] 씩 조절하여 Fig. 10과 같이 결과를 분석하였다.

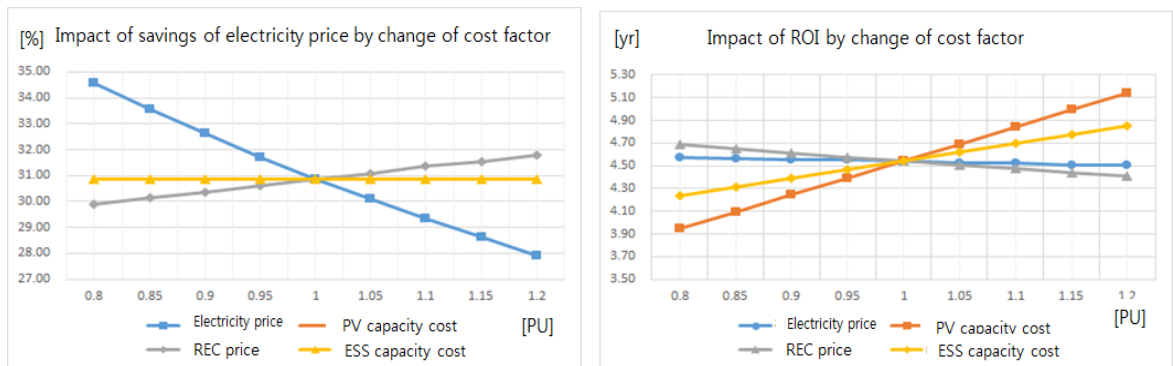


Fig. 10 Rate of change for electric cost and payback period by sensitivity analysis

Fig. 10은 PV 설치단가와 ESS 설치단가는 전기요금절감에 영향을 미치지 못하므로 전기요금 절감율은 일정하게 유지되고 있다. 전기요금의 변화와 REC 가격변화를 살펴보면 전기요금이 오르면 전기요금 절감율은 줄어들며, 전기요금 단가변화율(0.05)에 대하여 평균적으로 0.83[%] 변화하고 있다. 한편 REC 가격이 오르면 전기요금 절감율은 증가하며 단가변화율 0.05[PU]에 대하여 평균적으로 0.24[%] 변화하고 있다. 그러므로 전기요금 변화가 REC 가격변화보다는 PV+ESS 최적운영에 의한 전기요금절감이 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

특히, 투자회수기간에 미치는 민감도는 요금변화보다 설치가격에 가장 큰 영향을 미친다. 최근 REC 비용이 5만원/MWh (2019년 기준)로 급감함에 따라 기준 비용대비 변화율은 2배로 반영하여도, 투자회수기간은 약

0.5년 정도밖에 되지 않는 것으로 분석되었다. 이에 기술향상에 따른 PV 및 ESS 단위용량에 따른 설치단가가 낮추어진다면, 3020정책에 크게 일조할 것으로 판단된다.

Fig. 11과 같이 부하의 특성과 PV 및 ESS 용량과의 관계를 전기요금 절감을 및 투자회수기간 측면에서 정리하면 다음과 같다.

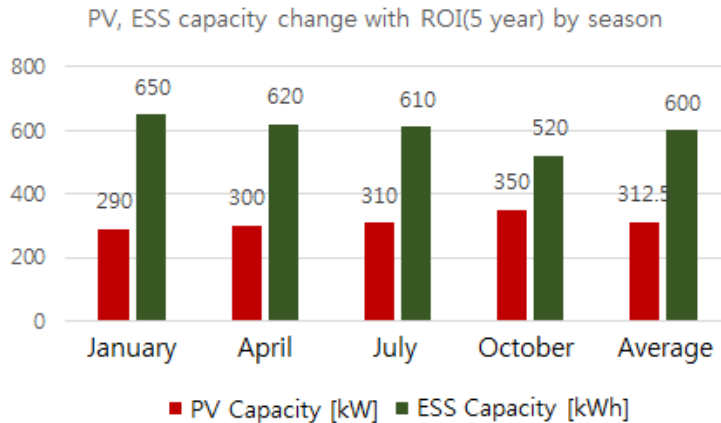


Fig. 11 Correlation of payback period and PV + ESS capacity

사례연구의 결과 투자회수기간이 약 5년 정도로 결정되는 PV 용량과 ESS의 용량은 계절별로 다소 상이하게 도출되었다. 이는 부하패턴에 따라서 PV 및 ESS 용량에 따른 운전효과가 달라지기 때문이다.

이를 종합해 보면 본 연구의 경우 PV 용량은 310 kW 이하 정도 ESS 용량은 600 kWh 이상 정도를 설치하면 투자회수기간이 약 5년 정도로 산출되었다. 즉, ESS의 용량은 600 kWh 이하 PV 용량은 300 kW 이상으로 설치하여야 투자회수기간을 5년 이하로 하여 경제성을 확보할 수 있게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 제로에너지건물에 액티브시스템의 효율적 운영을 위하여 PV+ESS의 최적운전 알고리즘을 개발하였다. 이때, 최적화기법으로는 DP를 적용하였으며, 본 연구에서 개발한 PV 와 ESS의 용복합 운용시 PV 와 ESS를 최적으로 운용하고자 1단계 PV 최적화, 2단계 PV + ESS 최적화, 3단계 최적운용으로 구분하여 결과를 정량적으로 분석하였다.

본 연구의 타당성을 입증하기 위해서 사례연구를 구성하여 운영결과를 도출하였다. PV 단독운전에 비하여 PV+ESS 용복합 운전의 전기요금이 절감되는 장점이 있으나, 경제성이 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서, ESS 운용의 목적은 전기요금의 절감뿐만 아니라 국가적으로 효율적인 에너지 사용을 위함에 있다.

그러므로 향후 ESS 시장의 활성화를 위해서는 단기적으로는 ESS 운용에 대한 인센티브를 강화함으로써 장기

적으로 시장 활성화 및 경제성을 향상시켜 최종적으로 수요에 반응할 수 있는 기반을 조성하도록 하여야 할 것으로 판단된다.

본 연구에는 PV + ESS의 운용에 영향을 미치는 Parameter에 대한 감도해석(Sensitivity Analysis)을 수행하여 향후 PV + ESS운용에 대한 유효한 정책적인 대책을 수립하기 위한 기초적인 정보를 제공하도록 하였다.

본 연구를 통해서 PV와 ESS의 설치용량 산정을 전력단가 측면에서 사례분석을 기반으로 최적인 알고리즘을 제시하였다. 이때, ESS용량 대비 PV 용량은 2:1 ~ 3:1에서 경제성이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

후기

이 논문은 2016년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20162010104270, 제로에너지빌딩 요소기술 패키지 (패시브 & 액티브) 융복합화 및 실증연구).

REFERENCES

1. Kim, S. H., Cha, S. M., Kwon, S. Y., Gang, N. E., Park, D. S., and Park, H. E., A Study on the Development Strategies of New Energy Industry for New Market Creation in Korea, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017.
2. All concerned ministries, Road-map for Clean Energy Technology (Building Sub-Report), pp.12, 2016.
3. Lee, S. I. and Kim, J. K., An Analysis of Effect on Demand Side Management about Energy Storage System (ESS) and the Market Creation Method, Korea Energy Economics Institute, pp. 14-23, 2018.
4. Ministry of Trade, Industry and Energy, Management and operation guidelines for the synergistic system of new and renewable energy supply and the mixed-fuel system, 2019.
5. Public-private joint ESS fire accident investigation committee, Results of ESS fire accident investigation, 2019.
6. Jeong, Y. J., Choi, J. H., and Ahn, S. S., PV-ESS System Operation Strategy Considering the PV Output Prediction Error, Vol. 31, No. 2, pp. 63-70, 2017.
7. Lee, W. G., Won, G. G., and Kim, B. H., A Research on PV-connected ESS dissemination strategy considering the effects of GHG reduction, Journal of energy engineering, Vol. 25, No. 2, pp. 94-100, 2016 .
8. Lee, L. D., A Study on the Optimum Capacity of PV-Connected ESS based on the Actual Data of Zero Energy Housing, Hanbat National University, 2018.
9. Um, J. Y. and Kim, Y. K., Economic Analysis of PV-Connected Home ESS Using HOMER, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 20, No. 2, pp. 36-42, 2019.
10. Allen, J. W., Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sone, Inc, 1996.