

DR과 피크저감을 고려한 ESS의 운용 알고리즘에 관한 연구

원종흥, 유현상, 최성문, 김지명, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

A Study on the Operational Algorithm of ESS Considering DR and Peak Shaving

Jong-Heung Won, Hyun-Sang You, Sung-Moon Choi, Ji-Myung Kim, Dae-Seok Rho*
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 최근, 전 세계적으로 신재생에너지원의 계통연계 안정화 및 피크저감용으로 ESS(energy storage system)의 설치가 매년 급증하고 있다. 여기서, ESS의 투자비용은 고가임으로 투자비 회수에 대한 사전 계획단계에서 편익과 비용 요소들에 대한 적절한 검토가 선행되어야 하고, ESS의 설치 및 운용에 따른 수익성은 제도나 정책에 크게 의존되므로, 경제성에 대한 평가가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 수익창출의 극대화를 위해, 기존의 피크저감과 더불어 DR(demand response) 참여를 고려하고, 이에 따른 운용 전략을 제시한다. 또한, 많은 일반 수용가에서 운용 중에 있는 피크저감용 ESS를 대상으로 피크저감 및 DR을 고려한 ESS의 운용 알고리즘을 제시하고, 이를 바탕으로 비용요소와 편익요소로 구성된 경제성 평가 모델링을 제시한다. 구체적으로, 비용요소는 ESS 건설비용과 운용비용을 고려하고, 편익요소는 기본요금 절감, 전력량요금 절감, 특례 요금제에 의한 기본요금 할인, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감, DR참여에 의한 수익을 바탕으로 산정한다. 상기의 알고리즘과 모델링을 바탕으로 DR을 고려한 피크저감용 ESS의 경제성을 평가한 결과, 피크저감 및 DR을 각각 80%, 100% 수행한 경우 ROI가 17.7년으로 산정되고, 피크저감 및 DR을 각각 100%, 80% 수행한 경우 ROI는 7.3년으로 산정되며, 피크저감과 DR을 동시에 100% 수행하면 ROI는 7년으로 산정되어, 피크저감용 ESS를 DR에 적극적으로 활용함으로써 어느 정도 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

Abstract Recently, the installation of energy storage system(ESS) for stable grid-connection of renewable energy sources and for peak shaving is rapidly increasing every year worldwide. Where, proper economical evaluation of cost and benefit factors is required in the pre-planning stage due to the high investment cost of ESS and the variation of profitability according to the policies. Therefore, in order to maximize the profit of ESS for peak shaving, this paper proposes operation strategy and algorithm by considering demand response(DR), and performs modeling of economical evaluation for peak shaving ESS in customers, which is composed of cost and benefit factors. Where, the cost factors consist of construction and operation cost, and also the benefit factors are calculated by benefit of basic electric price reduction, kwh price reduction, electrical industry foundation fund reduction and DR operation. From the simulation results based on the proposed algorithm and modeling, the ROI is calculated as 17.7 years when peak shaving and DR are performed by 80% and 100%, respectively, and the ROI is 7.3 years when peak shaving and DR are performed by 100% and 80%, respectively, and the ROI is calculated as 7 years when performing 100% of peak shaving and DR at the same time. Consequently, it is confirmed that additional profit is secured by utilizing ESS for peak shaving in DR.

Keywords : ESS, Peak Shaving, DR, Operation Strategy and Algorithm of ESS, Economical Evaluation, RIO

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원(20213030160080, (에너지 소비대체율 50% 달성을 위한 신재생에너지기반 융복합형 마을단위 마이크로그리드 실증 기술개발과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선형 융합연구사업(No. CPS22131-120)의 지원을 받아 수행되었습니다.

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

Received June 5, 2023

Revised August 8, 2023

Accepted August 10, 2023

Published August 31, 2023

1. 서론

최근, 신재생에너지원의 출력 안정화, 수요자원 관리(DR) 및 주파수 조정(FR) 등 다양한 기능을 수행하기 위하여, 전기저장장치(ESS)의 설치가 매년 급격히 증가하고 있다. 또한, 수용가에서는 피크전력 저감을 통한 기본요금 절감 및 충·방전 시의 전력량요금의 차에 의한 편익 등, 경제적인 목적으로 ESS를 설치하여 운용하고 있다. 여기서, 수용가의 피크저감 시간대와 DR 발령 시간대가 중첩되는 경우, 피크저감과 DR을 동시에 수행함으로써 추가적인 수익을 기대할 수 있으며, 이러한 수익은 제도나 정책에 크게 의존되므로 경제성에 대한 평가가 선행되어야 한다[1,2].

따라서, 본 논문에서는 DR을 고려한 피크저감용 ESS의 운용 전략 및 알고리즘을 제시하고, 이를 바탕으로 피크저감 및 DR 수행 정도에 따른 ESS의 경제성을 평가하기 위하여, 비용요소와 편익요소로 구성된 경제성 평가 모델링을 제시한다. 여기서, 비용요소는 ESS의 건설비용, 운용비용으로 구성되며, 편익요소는 ESS의 피크저감 효과에 의한 기본요금 절감, 전력량요금 절감, 특례 요금제에 의한 기본요금 할인, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감을 고려한다[3]. 상기의 모델링을 바탕으로 피크저감과 DR 수행 정도에 따른 경제성을 평가한 결과, 피크저감용 ESS를 DR에 적극적으로 활용함으로써 어느 정도 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

2. DR을 고려한 피크저감용 ESS의 운용특성

2.1 피크저감용 ESS의 운용특성

ESS는 크게 전력을 저장하는 배터리부, 교류와 직류를 상호 변환하는 전력변환장치부(power conditioning system, PCS)와 모니터링 및 제어를 담당하는 전력관리 시스템(power management system, PMS), 등으로 구성된다. ESS의 용도는 신재생연계용, 피크저감용, 주파수 조정용, 등으로 분류된다. 본 논문은 피크저감용 ESS를 대상으로 하고, Table 1과 같이 사계절을 통하여 경부하 시간대에 충전하고, 최대부하 시간대이고 동시에 피크가 발생하는 시간대에 방전하여, 대상 수용가가 ESS에 의한 피크저감 효과를 최대화한다. 이를 통해 얻는 편익은 기본요금 절감, 전력량요금 절감, 특례 요금제에 의한 기본요금 할인, 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감 등의 요소로 구성된다.

Table 1. Classification of loads by season and time

contents	summer	spring, fall	winter
	6~8	3~5, 9~10	11~2
off-peak time [hour]	23~09	23~09	23~09
mid-load time [hour]	09~10	09~10	09~10
	12~13	12~13	12~17
	17~23	17~23	20~22
peak-time [hour]	10~12	10~12	10~12
	13~17	13~17	17~20
			22~23

2.2 DR을 고려한 피크저감용 ESS의 운용특성

DR 제도는 전력사용 감축 의무를 사전에 계약한 수용가가 전력거래소의 지시를 받아 수요자원 감축을 통하여 전력소비 절감에 의한 인센티브를 받는 것으로서, 기본정산금과 실적정산금으로 구성된다. 또한, DR에 참여한 수용가는 자발적 수요감축에 참여할 경우, 고정 기본정산금과 의무감축 실적금 뿐만 아니라, 차등 기본정산금과 자발적 실적금을 추가로 받을 수 있다. 한편, DR은 수용가의 전력소비를 감축하는 방법 외에도 ESS의 방전을 통해 수행할 수 있어, 피크저감용 ESS가 설치된 수용가의 경우 DR에 적극적으로 참여하여 경제성을 확보할 수 있다.

하지만, 수용가의 피크저감 실행을 위하여 ESS의 방전을 수행하면 DR 발령 시 ESS의 충전시간의 미확보로 즉시 DR에 대응하지 못하는 제약이 있다. 이것은 기본정산금의 차감은 물론, 계약위반 누적 시 거래정지까지 이를 수 있는 문제점이 발생할 가능성이 있는데, 이를 개념도로 나타내면 Fig. 1과 같다. 여기서, Fig. 1의 Case I은 피크저감 후 DR이 발령되어 피크저감만을 수행한 경우이며, Case II는 가장 경제적인 운용전략으로 피크저감 실행시간대와 DR 발령 시간대가 일치하여 동시에 수행 가능한 것을 나타내고, Case III, IV는 피크저감을 실행한 후 DR에 대한 지시를 발령받아 각각 피크저감 80%, DR 80%씩 부분적으로 수행하는 경우를 나타낸다. 따라서, 본 논문에서는 DR과 피크저감을 고려한 ESS의 운용 알고리즘을 제시하고, 이를 바탕으로 현재가치 환산법과 원금 균등 상환방식을 이용한 경제성 평가를 모델링하여, DR과 피크저감 수행에 따른 편익과 손익분기점을 제시하고자 한다.

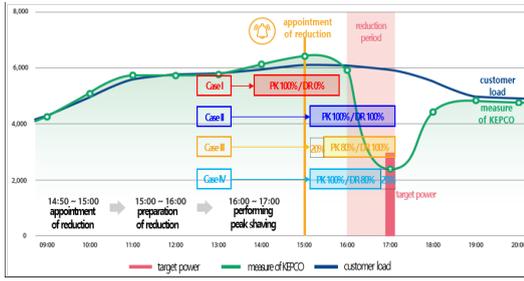


Fig. 1. Operation concept of peak shaving and DR

3. DR을 고려한 피크저감용 ESS의 운용 알고리즘

3.1 피크저감용 ESS의 운용 전략

본 논문에서는 ESS의 운용전략을 경제성을 최우선적으로 고려하여, 전기요금이 저렴한 경부하 시간대에 ESS를 충전하고, 부하의 급격한 사용으로 피크 전력이 발생하는 시간대에 15분 단위로 방전을 수행한다. 또한, 부하의 피크 전력 발생을 예측하기 위하여, 과거 15분간 누적된 전력량의 기울기를 사용한다. 여기서, 과거 15분간 전력량은 Eq. (1)과 같고, 이 식에 의하여 전력량의 기울기를 산정하면 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한, Eq. (2)에서 구한 기울기에 시간대를 고려하여 전력량 예측값을 구하면 Eq. (3)과 같다[4].

$$W_{15\min} = \int_0^T P(t) dt \quad (1)$$

$$\tan(\theta_{15\min}) = \frac{W_{15\min}}{T} \quad (2)$$

$$W_{fore}(t) = \tan(\theta_{15\min}) \cdot t + W_{now}(t) \quad (3)$$

where, $W_{15\min}$: electric energy in 15 minute[Wh], $\tan(\theta_{15\min})$: prediction criterion slope, $W_{fore}(t)$: prediction electric energy[Wh], $W_{now}(t)$: current electric energy[Wh]

한편, ESS의 피크저감 방식은 Eq. (4)와 같이 15분간의 최대전력($P_{now}(t)$)이 기준 피크전력(P_{peak})보다 크거나, 예측 전력량($W_{fore}(t)$)이 피크 전력량($W_{peak}(t)$)보다 큰 경우에 ESS를 방전하고, 그 외의 경우에는 충전이나 휴지 동작을 수행한다. 즉, Eq. (1)에서 Eq. (4)와 같

이, 피크전력 및 예측전력량에 따른 피크저감 ESS의 운용 전략은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 이러한 패턴의 ESS 운용을 통해 잔여 방전용량을 확보하여 피크전력을 효과적으로 감축할 수 있다.

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } P_{peak} < P_{15\min}(t) \text{ or } W_{peak}(t) < W_{fore}(t) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

where, P_{peak} : criterion peak power[kW], $P_{15\min}(t)$: peak power in 15 minute(kW), $W_{peak}(t)$: peak electric energy[kWh]

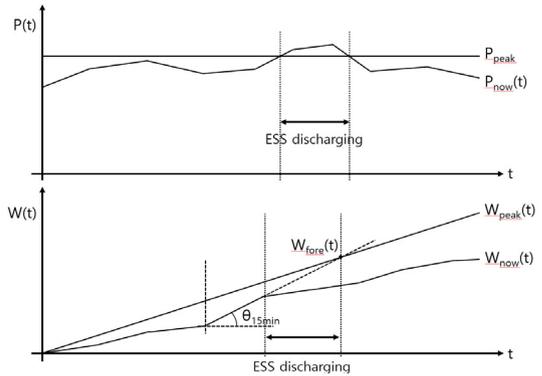


Fig. 2. Operation method of peak shaving ESS

3.2 DR을 고려한 피크저감용 ESS의 운용 전략

DR은 80% 이상을 수행하는 경우에만 인정을 받으므로, 이에 따라 본 논문에서는 피크저감 시간대와 DR 발령 시간대가 80% 이상 중첩되는 경우에만 DR을 수행하는 것으로 상정한다. 여기서, Fig. 3은 DR을 고려한 피크저감용 ESS의 운용 전략을 나타낸 것으로, Fig. 3(a)는 피크저감 실행시간과 DR 발령 시간이 불일치하여 피크저감만 100%로 수행이 가능한 경우(Case I)를 나타낸다. 또한, Fig. 3(b)는 피크저감 실행시간과 DR 발령 시간이 대부분 일치하여 100%로 수행이 가능한 경우(Case II)를 나타내며, 최대의 경제성을 기대할 수 있는 전략이다. Fig. 3(c)는 피크저감 시간대와 DR 시간대가 차이가 발생하여, 피크저감은 80%, DR은 100%를 수행하는 경우(Case III)를 나타내며, Fig. 3(d)는 피크저감이 100%, DR은 80%를 수행하는 경우(Case IV)를 나타낸다. 한편, 3회 이상 DR의 이행률이 80% 미만이면 DR로부터 배제되므로, 차기 DR 발령 시 우선적으로 참여를 고려할 필요가 있다.

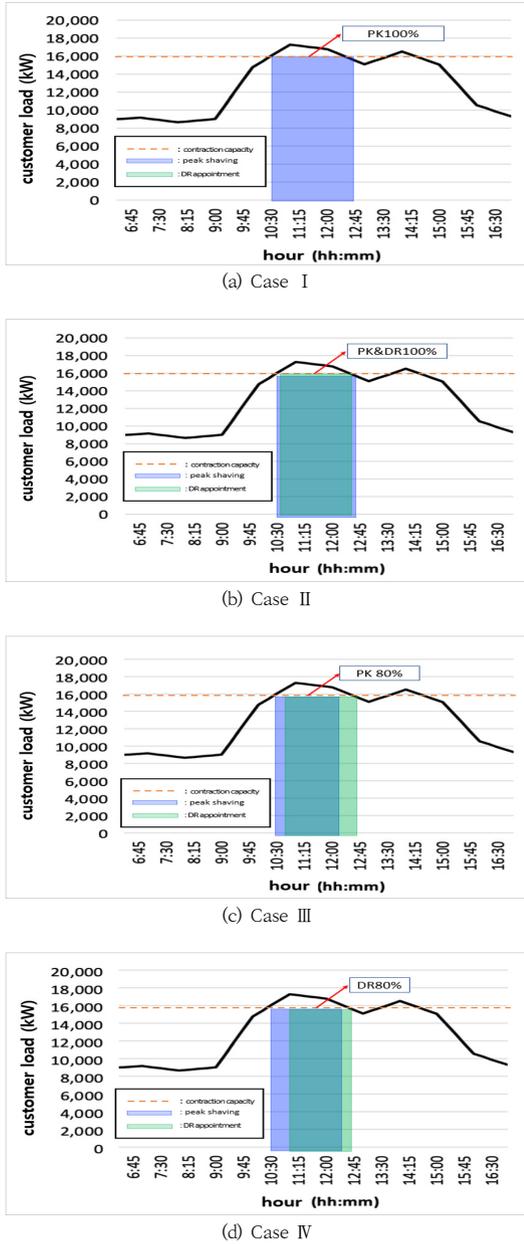


Fig. 3. Operation strategy of peak shaving and DR

3.3 DR을 고려한 피크저감용 ESS의 운용 알고리즘

상기의 3.1절 및 3.2절의 운용전략을 바탕으로 DR을 고려한 피크저감용 ESS의 운용 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 대상 수용가의 기준 피크전력(P_{peak}), 피크전력량($W_{peak}(t)$), DR 발령시간(t_{DR})을 상정

한다.

[Step 2] 대상 수용가의 15분간 최대전력($P_{15min}(t)$) 및 현재 전력량(W_{now})을 측정하고, Eq. (1)~Eq. (3)에 따라 15분간의 전력량의 기울기($\tan(\theta_{15min})$) 및 예측 전력량($W_{fore}(t)$)을 산정한다.

[Step 3] 15분간 최대전력이 기준 피크전력보다 크거나, 예측 전력량이 피크전력량보다 크면 [Step 4]로 이동하고, 아니면 [Step 8]로 이동한다.

[Step 4] 피크전력을 저감하기 위해 ESS를 방전하고, DR 수행 여부를 확인하기 위하여 [Step 5]로 이동한다.

[Step 5] 현재 시간이 DR 발령 후 일정시간(24분) 이내거나, 현재 시간 기준 일정시간(24분) 이내 DR이 발령되는 경우 [Step 6]로 이동하고, 아니면 [Step 7]로 이동한다.

[Step 6] DR의 80% 이상 수행이 가능하여 피크전력 저감과 DR을 동시에 수행하고, [step 8]로 이동한다.

[Step 7] DR의 80% 이상 참여가 불가능하여 피크전력 저감만 수행한다.

[Step 8] ESS를 충전 또는 휴지상태로 동작하고, 다음 시간대에 대하여 [step 2]로 이동하여 동일한 절차를 반복한다.

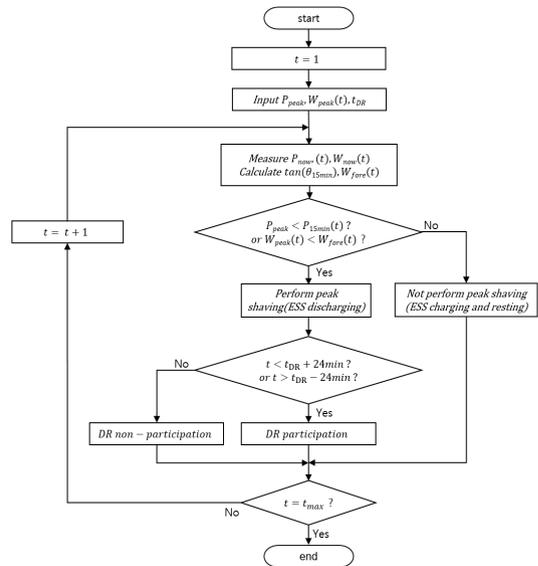


Fig. 4. Operation flowchart with DR and ESS peak shaving

상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 Fig. 4와 같다.

4. DR을 고려한 피크저감용 ESS의 경제성 평가 모델링

4.1 경제성 평가 기법

(1) 현재가치환산법

경제성 분석을 위한 비용과 편익의 요소는 미래에 발생할 가치로, 시간의 흐름에 따른 기회비용인 시간가치가 포함되어 있으므로 현재의 가치는 동일하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 DR을 고려한 피크저감용 ESS의 비용 및 편익을 Eq. (5)와 같이, 미래의 가치에 할인율을 적용한 현재가치법을 이용하여 동일한 시점의 가치로 환산하여 경제성을 평가한다[5].

$$PW = \sum_{i=1}^n \frac{CF}{(1+r)^i} \quad (5)$$

where, PW : present worth, CF : cash flow of i year(won), r : discount rate(%), i : target year for economic evaluation, n : unit period of year(20 years)

(2) 원금이자균등 상환방식

ESS의 설치비용은 경제성 평가기간 동안 원금을 균등하게 상환하는 조건으로, 은행에서 차입하는 이자율 및 할인율을 고려하여 산정한다.

4.2 비용 및 편익요소 모델링

4.2.1 비용요소 모델링

(1) ESS 건설비용

ESS의 건설비용은 ESS를 설치하는데 지출되는 총 비용으로서, Eq. (6)과 같이 PCS와 배터리 시스템의 도입 비용에 대하여 MW 및 MWh 설치용량을 곱하여 산정한다. 또한, ESS의 공사비는 PCS 및 배터리 시스템의 비용에 일정비율을 적용하는 것으로 산정한다.

$$C_{ess} = (C_{pcs} \cdot Q_{pcs} + C_{batt} \cdot Q_{batt}) \cdot (1 + r_{con}) \quad (6)$$

where, C_{ess} : total construction cost[won], C_{pcs} :

construction cost of PCS[won/MW], Q_{pcs} : capacity of PCS[MW], C'_{batt} : construction cost of battery system[won/MWh], Q_{batt} : capacity of battery system[MWh], r_{con} : construction cost rate of ESS[%]

(2) 운영비용

운영비용은 ESS를 운영할 때 발생하는 유지보수 비용으로서, Eq. (7)과 같이 ESS의 건설비용과 총 비용에 일정 값을 곱하며, 물가상승률을 평가연도별로 반영하여 산정한다.

$$C_{oper} = \sum_{i=1}^n [C_{ess} \cdot r_{oper} \cdot (1 + r_{inf}(i))^{i-1}] \quad (7)$$

where, C_{oper} : total operation cost[won], r_{oper} : rate of operation and construction cost[%], $r_{inf}(i)$: inflation rate[%]

4.2.2 편익요소 모델링

(1) 기본요금 절감

기본요금 절감은 ESS의 피크저감 효과에 의한 수용가의 최대수요전력의 감소로 발생하는 편익으로서, Eq. (8)과 같이 ESS가 도입되기 전의 수용가의 피크전력과 ESS 도입 이후의 피크전력 차이에 기본요금을 곱하여 산정한다.

$$B_{kW} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d \sum_{k=1}^h [(P_{peak}(i,j,k) - P_{ess}(i,j,k)) \cdot C_{kW}(i)] \quad (8)$$

where, B_{kW} : benefit of electric peak power shaving[won], $P_{peak}(i,j,k)$: electric peak power in customer[kW], $P_{ess}(i,j,k)$: electric peak power due to peak shaving ESS[kW], $C_{kW}(i)$: KW price [won/kW], i : unit period of year(20 years), j : unit period of date(365 days), k : target hour of economic evaluation

(2) 전력량요금 절감

ESS의 운용에 따른 전력량요금 절감에 의한 편익은 상대적으로 요금이 저렴한 경우 시간대에 ESS를 충전하고, 요금이 높은 최대부하 시간대에 방전시켜 발생하

는 차액으로, Eq. (9)와 같이 ESS가 도입되기 전의 수용가의 시간대별 사용 전력량과 ESS 도입 이후 총·방전 운전에 의해 변동된 수용가의 시간대별 사용 전력량의 차이에 전력량요금을 곱하여 산정한다[6].

$$B_{kWh} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{d_{oper}} \sum_{k=1}^h [(W_{kWh}(i, j, k) - W_{ess}(i, j, k)) \cdot C_{kWh}(i, j, k)] \quad (9)$$

where, B_{kWh} : benefit of electric energy reduction [won], d_{oper} : operating days of ESS per year, $W_{kWh}(i, j, k)$: power consumption in customer[kWh], $W_{ess}(i, j, k)$: power consumption in customer due to ESS operation[kWh], $C_{kWh}(i, j, k)$: kWh price[won/kWh]

(3) 특례 요금제에 의한 기본요금 할인

한전에서 시행 중인 특례요금제는 전력량요금 할인과 기본요금 할인으로 구성된다. 먼저, 전력량요금 할인은 경부하시간대 ESS 충전 시 전력량 요금의 50%만큼 할인해주는 제도로, 2021.01.01 이후로 일몰되어 할인금액을 정산받을 수 없다. 또한, 기본요금 할인은 Eq. (10)과 같이 일일 평균 최대수요전력 감축량으로 2020.12.31까지 피크감축 추정량에 해당하는 기본요금의 3배정도 할인해 주었지만, 2021.01.01부터 2026.03.31까지는 기본요금의 1배만큼만 적용된다[7-10].

$$B_{dis} = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m [P_{red}(i, l) \cdot C_{kW}(i)] \quad (10)$$

where, B_{dis} : benefit of discounting kW price[won], $P_{red}(i, l)$: monthly average of electric peak power shaving[kW]

(4) 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감

전력산업기반기금 및 부가가치세 절감은 ESS의 피크저감에 의한 기본요금 절감분과 계시별 요금제를 이용한 차익거래를 통한 전력량요금 절감분을 포함한 수용가 전기요금 절감액 및 특례 요금제에 의한 전기요금 할인금액에 대하여, Eq. (11), Eq. (12)과 같이 전력산업기반기금(3.7%)과 부가가치세(10%)의 정해진 비율만큼 각각 절감된다.

$$B_{fund} = (B_{kW} + B_{kWh} + B_{dis}) \cdot r_{fund} \quad (11)$$

$$B_{tax} = (B_{kW} + B_{kWh} + B_{dis}) \cdot r_{tax} \quad (12)$$

where, B_{fund} : benefit of Electrical Industry Foundation Fund reduction[won], r_{fund} : rate of Electrical Industry Foundation Fund[%], B_{tax} : benefit of VAT reduction[won], r_{tax} : rate of VAT[%]

(5) DR참여에 따른 수익

수요자원 거래시 장의 참여수익은 Eq. (13)과 같이, 고정기본정산금, 의무감축 실적금, 차등기본정산금, 자발적 실적금으로 구성된다. 여기서, 고정기본정산금은 Eq. (14)와 같이, 의무감축용량과 연간 기본정산금 단가를 곱하여 산정하며, 의무감축실적금은 Eq. (15)와 같이, 연간 기본정산금 단가와 감축시간에 SMP를 곱하여 산정한다. 또한, 차등기본 정산금은 Eq. (16)과 같이, 의무감축용량과 연간 기본정산금 단가와 곱하여 산정하며, 자발적실적금은 Eq. (17)과 같이, 낙찰용량, 낙찰시간과 SMP를 곱하여 편익을 산정한다.

$$B_{DR} = B_{fix} + B_{ob} + B_{diff} + B_{vol} \quad (13)$$

$$B_{fix} = C_{red} \times P_{ann} \quad (14)$$

$$B_{ob} = C_{red} \times t_{red} \times SMP \quad (15)$$

$$B_{diff} = C_{red} \times P_{ann} \quad (16)$$

$$B_{vol} = C_{bid} \times t_{bid} \times SMP \quad (17)$$

where, B_{DR} : benefit of DR[won], B_{fix} : benefit of fixed payment[won], B_{ob} : benefit of obligation reduction payment[won], B_{diff} : benefit of differential payment[won], B_{vol} : benefit of voluntary payment[won], C_{red} : kW of obligation reduction[kW], P_{ann} : unit price of fixed payment per year[won/kW], t_{red} : reduction time, C_{bid} : bid capacity, t_{bid} : bid time

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

DR을 고려한 피크저감용 ESS의 경제성 평가에 대한 시뮬레이션 조건은 Table 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 피크저감용 ESS의 용량은 1[MW]/2[MWh]로 상

정하고, 대출 상환기간은 20년, 이자율과 할인율은 각각 4.29%, 5.5%로 상정한다. 또한, PCS 및 ESS의 교체시기는 각각 15년, 10년을 고려하며, 운영비는 2.5%로 상정한다. 한편, 경제성 평가를 수행하기 위한 대상 수용가는 Fig. 5와 같이 석탄/원유 및 천연가스 광업산업의 평균 전력소비 일부하 패턴을 상정한다. 여기서, 계약용량은 17,289[kW], 계약종별은 '일반용(을) 고압A 선택(II)', 기본요금 단가는 8,320[원/kWh]로 적용한다. 또한, ESS의 충·방전 운용패턴은 사계절 동안 경부하 시간대인 0시~3시에 충전하고, 피크가 발생하는 10시~12시에 방전한다.

Table 2. Simulation conditions

items	contents
capacity of peak shaving ESS [MWh]	2
capacity of PCS [MW]	1
economic evaluation period [year]	20
interest rate [%]	4.29
discount rate [%]	5.5
time for PCS replacement [year]	15
time for battery replacement [year]	10
repayment method	equal repayment of principal
SMP [won/kWh]	107
operating cost [%]	2.5

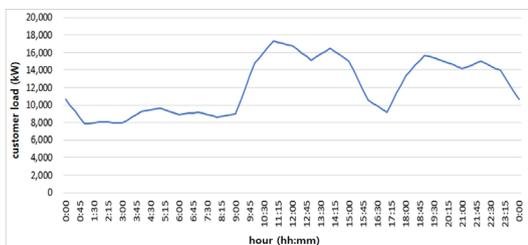


Fig. 5. Daily pattern of load demand in customer

Table 3. Peak shaving and DR assumed scenarios

Cases	operation rate of peak shaving	operation rate of DR
Case I	100%	0%
Case II	100%	100%
Case III	80%	100%
Case IV	100%	80%

한편, DR을 고려한 피크저감용 ESS 운용 알고리즘 및 경제성을 평가하기 위하여, Table 3과 같이 3가지의 시

나리오를 상정한다. 여기서, Case I은 피크저감과 DR은 발령 시간대 100% 중첩되는 경우, Case II는 피크저감 80%, DR은 100%인 경우이며, Case III는 피크저감은 100%, DR은 80%로 운용되는 경우를 나타낸다.

5.2 피크저감을 고려한 ESS의 타당성 평가

상기에서 제시한 운용방안 및 경제성평가 조건을 바탕으로, DR을 고려하지 않고 피크저감만을 수행한 Case I의 경제성을 평가하면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 피크저감에 의한 연간 편익은 142,572[천원]으로 산정되고, ROI가 배터리 수명시간을 초과하는 17.3년 정도이므로, 피크저감만을 수행하는 경우 경제성을 확보하기 어려움을 알 수 있다.

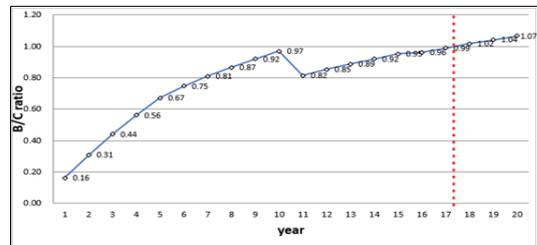
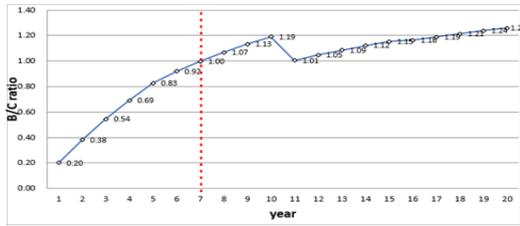


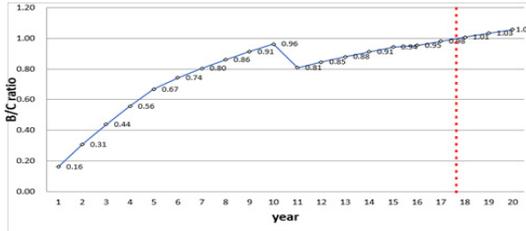
Fig. 6. ROI evaluation according to peak shaving (Case I)

5.3 DR 참여를 고려한 ESS의 타당성 평가

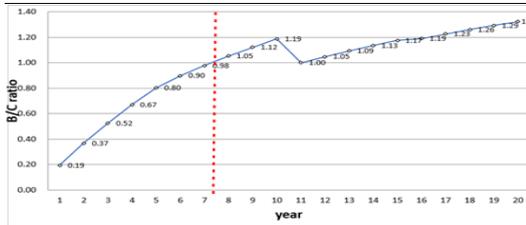
상기의 경제성평가 조건을 바탕으로, DR과 피크저감의 수행 정도에 따른 경제성 평가를 수행한 결과는 Fig. 7과 같다. 여기서, Fig. 7(a)와 같이 DR과 피크저감이 동일 시간대에 발생한 Case II의 경우에는 7년 정도에 ROI에 도달하여 ESS의 사업 타당성 측면에서 경제성이 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(b)와 같이 피크저감을 80%, DR을 100% 수행한 Case III의 경우, ROI가 배터리 수명시간을 초과하는 17.7년 정도로 산정되어, 피크저감의 수행 정도가 감소하면, ESS의 경제성 확보가 어려움을 알 수 있다. 한편, Fig. 7(c)와 같이 DR을 80% 수행하고, 피크저감을 100% 수행한 Case IV의 경우, ROI가 7.3년 정도이므로, 배터리 교체비용이 발생하기 전에 원금 회수가 가능하고, Case II에 비하여 더 일찍 ROI에 도달함을 알 수 있다. 따라서, 피크저감과 DR이 동시간대에 발생하지 않을 경우, DR보다 피크저감을 우선적으로 수행하는 것이 더 경제 적임을 알 수 있다.



(a) Case II



(b) Case III



(c) Case IV

Fig. 7. ROI evaluation according to DR and peak shaving

6. 결론

본 논문은 일반 수용가에 많이 설치·운영되고 있는 피크저감용 ESS의 수익창출의 극대화를 위해, 피크저감과 더불어 적극적인 DR 참여를 고려한 ESS 운용 알고리즘을 제시한다. 또한, DR을 고려한 피크저감 ESS의 비용요소와 편익요소로 구성된 경제성 평가 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 피크저감과 DR의 수행정도에 따른 경제성을 평가한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시뮬레이션 조건에 따라 피크저감용 ESS의 경제성을 평가한 결과, 피크저감만 100% 수행한 경우, ROI가 17.3년 정도로 산정되어 ESS의 수명을 초과하므로, ESS의 사업 타당성 측면에서 경제성이 없음을 알 수 있다.
- (2) 피크저감과 DR이 동일 시간대에 발생하여 각각

100% 수행한 경우, ROI가 7.0년 정도로 산정되어, 피크저감만을 수행한 경우에 비해 어느 정도 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

- (3) 피크저감과 DR의 시간대가 차이가 발생하여 피크저감은 80%, DR은 100%를 수행하는 경우, ROI가 17.7년 정도로 산정되며, 피크저감은 100%, DR은 80%를 수행하는 경우, ROI가 7.3년으로 산정되어, DR보다 피크저감을 우선적으로 수행하는 것이 더 경제적임을 알 수 있다.

References

- [1] B. O. Kang, B. G. Hwang, K. Kwon, J. S. Jung, "Operational Strategy of Energy Storage System (ESS) to Participate in Demand Response(DR) Market for Industrial Customer", *New & Renewable Energy*, Vol. 13, No. 2, 2017. 6. DOI: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2017.6.13.2.004>
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Comprehensive Strategy for the Diffusion of Energy New Industries and Regulatory Reform", 2016.
- [3] S. H. Jeon, Y. K. Kim, J. S. Jung, S. D. Kim, "Feasibility Analysis of Tariff System for the Promotion of Energy Storage Systems (ESSs)", *New & Renewable Energy*, Vol. 15, No. 3, 2019. 9. DOI: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2019.9.15.3.069>
- [4] D. M. Park, S. M. Choi, S. Jian, B. G. Han, D. S. Rho, "A Study on EMS Operation Algorithm for Peak Demand Management of Small Zero Energy Building", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 23, No. 5, pp. 580-589, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.5.580>
- [5] K. H. Kim, B. G. Han, J. Shen, J. M. Kim, D. S. Rho, "A Study on Operation Strategy and Economical Evaluation of Energy Prosumer Considering Power Trading Methods", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 23, No. 1, pp. 618-626, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.1.618>
- [6] J. T. Jeon, J. Shen, H. D. Lee, D. S. Rho, "A Study on Economic Evaluation Modeling of Power Amplification Device for MW-scale PV System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 22, No. 9, pp. 1-9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.9.1>
- [7] J. H. Son, "A Study on Economic Analysis Algorithm For Energy storage System Considering Peak Reduction and a Special Tariff", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* Vol. 67, No. 10, 2018. 11. DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.10.1278>

- [8] S. B. Son, H. C. Song, "Generation of Daily Load Curves for Performance Improvement of Power System Peak-Shaving", Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 24, No. 2, 2014. 04, pp. 141-146.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5391/JKIIS.2014.24.2.141>
- [9] G. H. Lee, K. W. Lee, "Optimal Operating Method of PV+ Storage System Using the Peak-Shaving in Micro-Grid System", Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering, Vol. 43, No. 2, 2020, pp. 1-13.
DOI: <https://doi.org/10.11627/jkise.2020.43.2.001>
- [10] D. K. Kim, S. H. Jeong, Y. M. Wi, "A Study on Development of Reliability based Demand Response Program for Jeju Power Systems", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 71, No. 10, p.1368-1375
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.10.1368>

원 종 흥(Jong-Heung Won) [준회원]



- 1999년 8월 : 한국방송통신대학교 행정학과 (행정학사)
- 2019년 1월 ~ 2022년 12월 : 충주직업전문학교 교사
- 2020년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>
전기저장장치, 신재생에너지, 전력 및 배전계통

유 현 상(Hyun-Sang You) [준회원]



- 2019년 8월 : 충남대학교 전기공학과 (공학사)
- 2020년 7월 ~ 2022년 7월 : 한국산업기술시험원 연구원
- 2022년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>
전기저장장치, 신재생에너지, 보호협조

최 성 문(Sung-Moon Choi) [정회원]



- 2020년 2월 : 호원대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>
배전계통 운용, ESS, 마이크로그리드, 신재생에너지

김 지 명(Ji-Myung Kim) [정회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>
전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

노 대 석(Dae-Seok Rho) [종신회원]



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

<관심분야>
전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석