

# 피크저감과 특례요금제를 고려한 ESS 경제성 분석 알고리즘에 관한 연구

## A Study on Economic Analysis Algorithm for Energy Storage System Considering Peak Reduction and a Special Tariff

손 준 호\*  
(Joon-Ho Son)

**Abstract** - For saving electricity bill, energy storage system(ESS) is being installed in factories, public building and commercial building with a Time-of-Use(TOU) tariff which consists of demand charge(KRW/kW) and energy charge(KRW/kWh). However, both of peak reduction and ESS special tariff are not considered in an analysis of initial cost payback period(ICPP) on ESS. Since it is difficult to reflect base rate by an amount of uncertain peak demand reduction during mid-peak and on-peak periods in the future days. Therefore, the ICPP on ESS can be increased. Based on this background, this paper presents the advanced analysis method for the ICPP on ESS. In the proposed algorithm, the representative days of monthly electricity consumption pattern for the amount of peak reduction can be found by the  $k$ -means clustering algorithm. Moreover, the total expected energy costs of representative days are minimized by optimal daily ESS operation considering both peak reduction and the special tariff through a mixed-integer linear programming(MILP). And then, the amount of peak reduction becomes a value that the sum of the expected energy costs for 12 months is maximum. The annual benefit cost is decided by the amount of annual peak reduction. Two simulation cases are considered in this study, which one only considers the special tariff and another considers both of the special tariff and amount of peak reduction. The ICPP in the proposed method is shortened by 18 months compared to the conventional method.

**Key Words** : Energy storage system, Electricity bill, peak reduction, MILP, Payback period

### 1. 서 론

제 8차 전력수급기본계획에 따르면, 원자력 발전소의 원자로는 2030년까지 18기(현재 24기)로 감소되고 신규 원전 6기 건설은 중단되며 노후 원전 10기의 수명연장도 금지된다. 또한 원자력 발전 비중은 30.3%에서 23.9%로, 석탄화력 발전은 45.3%에서 36.1%로 줄어들며, 신재생에너지 및 LNG 발전은 지속적으로 확대된다. 특히 현재 6.2%를 차지하는 신재생에너지 비중은 2030년 20%까지 증가될 예정이다[1]. 이러한 국가 에너지정책 기조에 따라, 태양광발전, 풍력발전의 도입을 장려하기 위해 일정규모(500MW) 이상의 발전설비(신재생에너지 설비는 제외)를 보유한 발전사업자(공급의무자)에게 총 발전량의 일정비율 이상을 신재생에너지를 이용하여 공급토록 의무화한 신재생에너지 공급의무화제도(Renewable Portfolio Standard, RPS)가 실시되고 있으며, 신재생에너지 발전량에 따른 재생에너지 공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC)와 계통한계가격(System

Marginal Price, SMP) 등의 전력거래가 활성화되고 있다[2-3]. 뿐만 아니라, 신재생에너지 출력 변동으로 인한 계통 불안정성 해소와 피크저감을 위해서, 전력저장장치(Energy Storage System, ESS)의 도입이 진행되고 있다. ESS는 크게 전력을 저장할 수 있는 배터리, 교류와 직류를 상호 변환하는 전력변환장치(Power Conditioning System, PCS), PCS 상태 모니터링 및 제어를 담당하는 전력관리시스템(Power Management System, PMS)으로 구성된다. ESS는 주로 태양광 연계형, 풍력 연계형, 피크저감형의 3가지 용도로 사용되고 있는데, 첫째 태양광 연계형은 선로 과부하를 줄이기 위하여 태양광 발전시간(10~16)에 ESS를 충전하고 16시 이후에 방전하여 높은 REC 가중치를 적용 받는다. 두 번째로, 풍력 연계형은 풍력발전으로 생산된 전력을 ESS로 충전하여 피크시간(봄:9~12, 여름:13~17, 가을:18~21, 겨울: 9~12)에 방전함으로써 높은 REC 가중치를 적용 받는다[4]. 마지막으로 피크저감형 ESS는 수용가의 최대전력수요 시간동안 방전되어 기본요금을 절감시키고, 계시별 전기요금 차등에 따라 야간에 저렴한 전기를 충전하고 전기요금이 비싼 주간에 방전하여 전력량요금을 절감시킨다. 또한 계약전력 1,000kW 이상의 건축물에 계약전력 5% 이상 규모의 ESS를 설치해야 하는 공공기관 에너지이용합리화에 따라 ESS 도입이 증가되고 있을 뿐만 아니라, 한전에서 한

\* Corresponding Author : ESS Sales/Engineering Team, LG Electronics, Seoul, Korea.

E-mail : joonho.son@lge.com

Received : August 5, 2018; Accepted : September 11, 2018

시적으로 시행중인 ESS 특례요금제도 도입을 통해 수용가의 ESS 초기투자비 회수기간은 단축될 수 있다[5-6].

반면, ESS 투자비용은 여전히 고가임으로 투자비 회수에 대한 부담이 있다. 그러므로 ESS 사업의 실행가능성 판단을 위해서는 사전계획단계에서 미래에 발생할 피크저감분이 반영된 기본요금 절감액, 충·방전에 따른 요금차액분이 반영된 전력량 요금 및 특례요금제에 대한 면밀한 검토가 선행되어야 한다. 특히 기존의 피크저감량은 과거 발생한 피크일을 기준으로 산정하고 있어 과잉 산정되는 경향이 있다. 즉, 실제 피크가 발생되면 피크저감에 따른 기본요금 절감효과가 커 전체수익에 큰 영향을 미치지만, 만약 피크가 발생되지 않으면 초기 피크저감량이 반영된 기본요금 절감 효과분이 반영되지 않아 투자비 회수기간이 길어지는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 각월의 부하사용패턴이 적절히 반영된 대표일을 바탕으로 피크저감량이 산정된다면, 수용가 또는 투자자 관점에서 ESS 투자비 회수기간과 사업 타당성 분석을 통해 합리적인 사업제안이 가능하다.

본 논문에서는 피크저감용 ESS에 대해서, 피크저감과 특례요금제도를 고려한 경제성 분석 알고리즘을 제안한다. 즉, 월간 부하패턴이 반영된 대표일의 총 에너지 비용은 피크저감과 특례요금제가 고려된 일일 ESS 운전 스케줄링에 의해 최소화되며, 연간 편익은 피크저감량에 의해 결정된다. 제안된 알고리즘의 유효성을 확인하기 위해서 특례요금제만 고려된 경우와 특례요금제 및 피크저감이 고려된 경우의 ESS 초기투자비 회수기간을 비교 분석하였다.

## 2. 기존 ESS 경제성 분석의 문제점

한전은 계시별 요금을 적용받는 수용가 중 피크절감을 위해 ESS를 설치한 고객을 대상으로 요금할인을 확대하여 수용가의 조속한 투자결정, 초기 시장 정착, 자발적인 ESS 시장 운영체계를 유도하고 있다[7]. 특례요금제도는 기본요금 절감과 전력량요금 절감으로 구성되는데, 예를 들어, 개정 전 평균 최대수요전력 감축량에 대해, '20년 12월 31일까지는 기본요금 절감액의 3배만큼, '26년 3월 31일까지는 기본요금 절감액의 1배만큼 할인된다. 한편, 전력량요금은 경부하시간대 총전전력에 대해 50% 할인된다. 또한, ESS 배터리 사용량이 계약전력 대비 10% 이상시, 상기의 기본요금과 전력량요금 각각에 대해서 최대 120% 추가 할인된다. ESS는 수용가에게 큰 편익을 줄 수 있지만, 높은 투자비용(배터리 가격이 총공사비의 60% 이상 차지)으로 인해 ESS 초기 투자비 회수기간이 상당히 소요됨으로 회수기간 단축을 위한 ESS의 효율적인 운영이 요구된다.

반면 ESS의 피크저감량은 수용가의 부하패턴에 따라서 결정되는데, 연간 최대수요전력이 발생하는 중간부하 또는 최대부하시간대 방전을 통하여 기본요금은 절감될 수 있다. 또는 ESS를 최대부하시간대에 방전하면 특례요금제의 피크감축 추정량에 해당하는 기본요금을 추가적으로 할인 받는다. 그러므로, 여름철 또는 겨울철 최대수요전력이 발생하는 중간부하시간대 방전하면 피크저감에 따른 기본요금은 절감되지만, 최대부하시간대에 방전량이 감소하여 특례요금제의 기본요금 할인액이 감소될 수 있다. 반대

로 ESS를 특례요금제의 기본요금 할인을 위해 최대부하시간대만 방전한 경우, 피크저감량이 감소하여 기본요금 절감액이 감소될 수 있다. 즉, 기존 ESS 경제성 분석에서, 피크저감량 산정의 어려움으로 인하여 피크저감에 따른 기본요금 절감액을 반영하지 않고 특례요금제만 고려하여 투자비 회수기간이 늘어날 수 있다. 또한 피크저감과 계시별요금제가 고려된 ESS 일일 운영 스케줄링이 제시되고 있지 않아 기본요금 및 전력량요금 절감액 결정에 어려움이 있다. 그러므로, 피크저감과 특례요금제를 고려한 일일 ESS 충·방전 스케줄링 방안이 마련되어야 하며, 이에 기반하여 ESS 초기투자비 회수기간은 적절하게 산정되어야 한다.

## 3. 피크저감과 특례요금제가 고려된 일일 ESS 운영 스케줄링

본 절에서는 ESS 초기투자비 회수기간 분석을 위해서, 피크저감과 특례요금제가 반영된 일일 ESS 충방전 스케줄링을 제안한다. 즉, 3.1~3.7장에서 혼합정수 선형프로그래밍을 통해 피크저감과 특례요금제가 고려된 15분단위의 충·방전량에 기초하여 수용가 전기요금측면과 특례요금제측면에서 결정된 각각 기본요금 및 전력량요금 통해 총 예상 절감액이 산출된다.

### 3.1 목적함수

식 (1)과 같이 부하패턴에 따른 피크저감 특성이 반영된 각월의 대표일과 발생확률을 활용하여 피크저감과 특례요금제에 따른 기본요금 및 전력량 절감이 고려된 기대 전기요금을 최소화한다.

$$\min \sum_{d=1}^{n_d} \sum_{h=1}^{n_h} p^{(d)} \cdot C_h^{(d)} - C_{EB} \quad (1)$$

여기서,  $d$ : 각 월의 대표일 시나리오,  $h$ : 일일 15분 간격,  $n_d$ : 각월의 대표일 시나리오의 개수,  $n_h$ : 96,  $p^{(d)}$ : 각 월의 대표일 시나리오 발생확률,  $C_h^{(d)}$ : 각 월의 대표일 시나리오에 따른 기대 전기요금[원],  $C_{EB}$ : 수용가 피크저감에 따른 기본요금 절감액[원]

각월의 대표일 시나리오에 따른 기대 전기요금은 식 (2)와 같이 전력회사로부터 구입된 전력량요금에 특례요금제에 따른 전기요금 할인액의 차이로 표현된다.

$$C_h^{(d)} = U_{T,h} \cdot P_{Utility,h}^{(d)} \cdot \frac{15}{60} - C_{KS,h}^{(d)} \quad (2)$$

여기서,  $U_{T,h}$ : 계시별 전기요금 단가[원/KWh],  $P_{Utility,h}^{(d)}$ : 전력회사로부터 구입된 전력[KW],  $C_{KS,h}^{(d)}$ : ESS 특례요금제에 따른 전기요금 할인액[원]

### 3.2 수요공급조건

수용가의 ESS를 통한 전력구입비 변동에 따른 전기요금 절감

효과 분석을 위해서 식 (3)의 수요공급조건이 필요하다. 즉, 전력 회사에서 구입한 총 전력은 총·방전 전력을 제외한 전력소비와 ESS의 순총·방전 전력의 합과 같다.

$$P_{Utility,h}^{(d)} = P_{D,h} + P_{ESS,h}^{(d)} \quad (3)$$

여기서,  $P_{D,h}$ : ESS 총·방전 전력을 제외한 전력[kW],  $P_{ESS,h}^{(d)}$ : ESS 순총·방전 전력[kW]

### 3.3 ESS 운전조건

ESS의 순총·방전 전력은 식 (4)와 같이 충전전력 또는 방전 전력에 의해서 결정되며, 배터리 잔존용량(State of Charge, SOC)은 식 (5)와 같이 총·방전 효율이 반영된 충전전력과 방전전력의 합으로 나타낸다.

$$P_{ESS,h}^{(d)} = P_{ESS,h}^{+(d)} - P_{ESS,h}^{-(d)} \quad (4)$$

$$SOC_{h+1}^{(d)} = SOC_h^{(d)} + \frac{15}{60} \cdot \left\{ \eta \cdot P_{ESS,h}^{+(d)} - \frac{1}{\eta} \cdot P_{ESS,h}^{-(d)} \right\} \quad (5)$$

( $SOC_1 = SOC_{96}$ )

여기서,  $P_{ESS,h}^{+(d)}$ : ESS 충전전력[kW],  $P_{ESS,h}^{-(d)}$ : ESS 방전전력[kW],  $SOC$ : 배터리 잔존용량[kWh],  $SOC_1$ : 일일 첫번째 시간 간격의 배터리 잔존용량,  $SOC_{96}$ : 일일 마지막 번째 시간 간격의 배터리 잔존용량,  $\eta$ : ESS 총·방전 효율(one-way)

### 3.4 ESS 운전조건

요금적용전력은 식 (6)에 의해서 제한되며 중간부하 또는 최대 부하시간동안 ESS의 방전을 통한 피크저감량에 따라 감소될 수 있다. ESS의 총·방전 전력은 식 (7), 식 (8)과 같이 ESS의 최대출력 범위 안에서 결정된다. 배터리에 저장된 에너지는 식 (9)와 같이 최대 배터리 저장용량을 초과할 수 없다.

$$0 \leq P_{Utility,h}^{(d)} \leq P_{Utility}^{max} - P_{RD}, (P_{RD} \neq 0, 39 \leq h \leq 92) \quad (6)$$

$$P_{ESS,h}^{-(d)} \leq P_{ESS}^{max} \cdot \mu_h^{(d)} \quad (7)$$

$$P_{ESS,h}^{+(d)} \leq P_{ESS}^{max} \cdot (1 - \mu_h^{(d)}) \quad (8)$$

$$SOC^{min} \leq SOC_h^{(d)} \leq SOC^{max} \quad (9)$$

여기서,  $P_{Utility}^{max}$ : 요금적용전력[kW],  $P_{RD}$ : 피크저감량[kW],  $P_{ESS}^{max}$ : ESS 최대 총·방전 가능 출력[kW],  $\mu_h^{(d)}$ : ESS 동작모드를 나타내는 2진 변수(충전=0 또는 방전=1),  $SOC^{min}$ : 배터리 최저 저장 가능용량[kWh],  $SOC^{max}$ : 배터리 최대 저장 가능용량[kWh]

### 3.5 수용가 전기요금 절감

수용가의 전기요금은 크게 기본요금[원/kW]과 전력량요금[원/kWh]으로 구성되며, 기본요금은 월 중 12월분, 1월분, 2월분, 7

월분, 8월분, 9월분 및 당월 분중 가장 큰 최대수요전력을 요금 적용 전력이라고 하며, 이때 ESS 방전을 통하여 낮춘 요금적용 전력만큼 기본요금이 절감된다. 또한 계시별 요금제에 따라 평일 경부하시간대 ESS를 충전하여 최대부하시간대 또는 토요일 중간 부하시간대 방전을 통해 발생된 전력 차액만큼 전력량요금은 절감된다.

### 3.6 특례 요금제에 의한 전기요금 할인

한전에서 시행중인 특례요금제는 전력량요금 할인과 기본요금 할인으로 구성된다. 전력량요금 할인 경부하시간대 ESS 충전시 2020년 12월 31일까지 전력량 요금의 50%만큼 할인되며, 계약전력 대비 ESS 배터리용량 비율이 10% 이상인 경우, 전력량 요금에 대해서 120%만큼 추가 할인된다. 기본요금 할인은 일일 평균 최대수요전력 감축량으로 2020년 12월 31일까지 피크감축 추정량에 해당하는 기본요금의 3배만큼 할인되며, 2021년 01월01부터 2026년 03월 31일까지 기본요금의 1배만큼 할인된다.

### 3.7 전력산업기반기금 및 부가가치세 절감

수용가 전기요금 절감액과 특례 요금제에 의한 전기요금 할인액에 해당하는 전력산업기반기금(3.7%)과 부가가치세(10%)만큼 각각 절감된다.

## 4. 제안된 ESS 경제성 분석 알고리즘

그림 1과 같이 본 논문에서 ESS 경제성 분석 알고리즘은 다음과 같이 제시된다.

**[Step 1]** 한전에서 수용가의 효율적인 전력사용을 지원하고 수요관리 효과를 극대화하기 위한 목적으로 개설된 전력포털 서비스 (iSMART)를 통하여 수용가의 연간 평일 15분 단위의 최대 수요 kW 데이터를 수집한다[8].

**[Step 2]** 수집된 최대수요 데이터를 바탕으로 실루엣 기법을 활용하여 k 클러스터링 개수를 결정한다[9].

**[Step 3]** 각 월의 전기사용 패턴이 적절히 반영된 대표일을 결정하기 위해 k-means 클러스터링 알고리즘이 적용된다. k-means 클러스터링 알고리즘은 주어진 데이터들에 대해서 통계적 규칙이나 패턴을 찾아내는 데이터 마이닝 기법 중에 하나로 데이터간의 유사한 특성을 가지는 k개의 그룹으로 분할하는 알고리즘이다. 본 논문에서는 각월의 평일 15분 최대수요 데이터에 대해서 n개의 중심점을 선정 후, 이 중심점에서 각 15분 최대수요 데이터간의 거리 합이 가장 최소화가 되는 중심점의 위치를 찾는다. 결국 이 n개의 중심점의 변화가 없는 위치가 각 클러스터링 데이터의 평균값을 위치로 가지게 되며, 이 중심점에서 가까운 점들을 중심점을 기준으로 묶고 각 클러스터에 대해서 15분 최대수요 데이터의 모든 중심점들을 각월의 대표일로 선정한다[10].

**[Step 4]** PCS 용량에 따라 피크저감 가능용량 범위가 결정되며, 피크저감량은 최소 0kW부터 최대 PCS 용량만큼 증가시켜 가

면서 해를 찾는 전수탐색기법과 혼합정수선형 프로그래밍을 통해 각 월 대표일의 기대 전기요금을 최소화한다. 그리고 각 월 대표일의 총 예상 절감액을 산출하며 12개월에 해당하는 모든 대표일의 예상 절감액의 합이 가장 큰 피크저감량이 본 논문에서 제안하는 피크저감량이며, 각 월의 예상 절감액이 최대화 되도록 대표일에 대한 ESS 일일 충방전 운영 스케줄링을 결정할 수 있다.

[Step 5] 경제성 분석은 일반적으로 현금유입의 현가에서 현금유출의 현가를 빼는 순현가법이 주로 활용되고 있으나, 본 논문에서는 투자자 입장에서 ESS 조합에 따라 짧은 투자비 회수기간 분석을 목적으로 한다. 이를 위해서 ESS 투자에 소요된 비용을 회수하는데 걸리는 기간을 분석하는 회수기간법이 적용된다. 즉, ESS의 일일 충·방전 스케줄링의 결과값을 식 (10)~(11)에 대입하여, ESS 초기 투자비용을 회수하는데 걸리는 기간을 분석한다. 투자비 회수기간은 식 (10)과 같이 년도별 연간절감액에 대한 연간투자순이익으로 표현되며, 연간투자순이익은 식 (11)과 같이 산정된다.

$$PP_y^{(i)} = \frac{-AP_y^{(i)}}{\frac{AS_y^{(i)}}{12}}, \text{ (if } PP_y^{(i)} \leq 0, \text{ stop)} \quad (10)$$

$$AP_{y+1}^{(i)} = AS_{y+1}^{(i)} + (AS_y^{(i)} - TC) \quad (11)$$

$$(AS_0^{(i)} = 0)$$

여기서,  $y$ : 년수,  $i$ : ESS 용량 개수,  $PP_i$ : 투자비 회수기간[년],  $AS_y^{(i)}$ : 연간 절감액[원],  $AP_y^{(i)}$ : 연간투자순이익[원], 12: 개월수,  $TC$ : 투자비[원]

### 5. 시뮬레이션 분석 및 결과

본 절에서는 현재 운영중인 상업용 빌딩을 대상으로  $k$ -means 클러스터링을 통한 각 월의 대표일 선정, 혼합정수 선형프로그램을 통한 일일 ESS 충·방전 운영 스케줄링을 기초로 한 피크저감

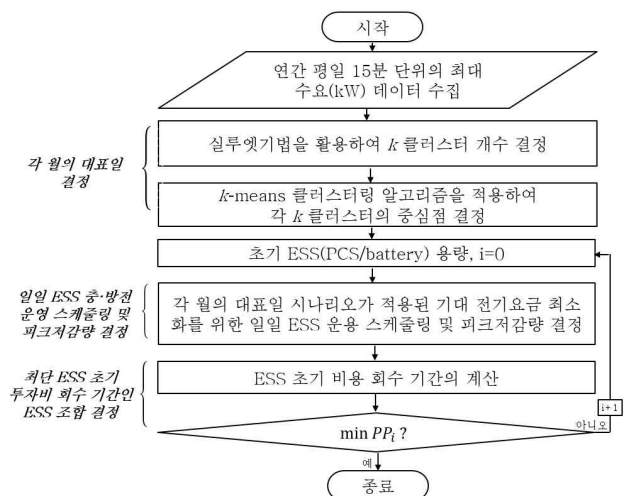


그림 1 제안된 ESS 경제성 분석 알고리즘  
Fig. 1 The proposed ESS economic analysis algorithm

량을 산정하였다. 또한 특례요금제만 고려한 경우와, 특례요금제와 피크저감을 고려한 경우 각각의 ESS 초기투자비 회수기간과 15년간 총 절감액에 대해 비교 분석을 통하여 제안한 ESS 경제성 분석 알고리즘의 유효성을 확인 하였다.

### 5.1 시뮬레이션 조건

국내 대표적인 L쇼핑몰 중 한곳을 대상으로, 제안된 알고리즘의 유효성을 확인하였다. L쇼핑몰의 적용전기요금은 표 1과 같이 일반용(을) 고압A 선택(II)이며, 기본요금 단가는 8,320원/KW이다. 계시별 요금차액의 크기는 여름철, 겨울철, 및 봄/가을철 순이다. 계시별 시간대는 표 2와 같으며, 경부하시간대는 23:00~09:00이며, 여름철, 및 봄/가을철 최대부하시간대는 10:00~12:00, 13:00~17:00이다. 2016년 L쇼핑몰의 모든 상점의 입주가 완료되어 2017년부터 정상영업중이고 향후 부하변동은 미미하며 ESS의 상업운전은 2018년 10월 1일부터 시작하여 평일과 토요일만 운전한다. 또한 표 3의 요금적용전력은 2017년도 평일 245일의 15분 최대수요 데이터를 활용하여  $k$ -means 클러스터링 알고리즘을 통해 얻는 대표일 중 가장 큰 값인 15,188kW 이다. 배터리 방전 깊이(depth of discharge, DOD)는 90%, ESS 충·방전 효율(one-way)은 15년간의 변압기(98.8%), PCS(97.3%), 및 배터리 효율(94.1%)과 배터리 열화율(84.8%)의 평균효율인 77%를 적용하였다. ESS 경제성 분석을 위한 적용일수는 표 4와 같이 2017년을 기준으로 평일 245일 토요일 52일을 적용하였으며, PCS와 배터리 조합 및 품목별 단가는 표 5, 6과 같다.

### 5.2 각 월의 대표일 선정

표 1 전기요금 (일반용(을)고압A 선택(II))

Table 1 Electric Rates (General Service (B))

구분	기본요금 (원/KW)	전력량요금(원/KWh)			
		시간대	여름철 (6~8월)	봄·가을철 (3~5,9~10월)	겨울철 (11~12월)
고압 A	8,320	경부하	56.1	56.1	63.1
		주간부하	109.0	78.6	109.2
		최대부하	191.1	109.3	166.7

표 2 계절 & 시간대 분류

Table 2 Season & Time-period classification

시간대별/계절별	여름철 (6~8월)	봄·가을철 (3~5,9~10월)	겨울철 (11~12월)
경부하	23:00~09:00	23:00~09:00	23:00~09:00
주간부하	09:00~10:00	09:00~10:00	09:00~10:00
	12:00~13:00	12:00~13:00	12:00~17:00
	17:00~23:00	17:00~23:00	20:00~22:00
최대부하	10:00~12:00	10:00~12:00	10:00~12:00
	13:00~17:00	13:00~17:00	13:00~20:00 22:00~23:00

표 3 시뮬레이션 매개변수

Table 3 Simulation parameters

매개변수	변수 값
$\eta$	77%
$P_{Utility}^{max}$	15,188kW
DOD	90%

표 4 적용된 ESS 운영일수

Table 4 Applied ESS operation days

평일 (245일)	여름철			봄/가을철					겨울철			
	6월	7월	8월	3월	4월	5월	9월	10월	1월	2월	11월	12월
	21	21	21	22	20	21	21	17	20	20	22	19
토요일 (50일)	4	5	4	4	5	4	5	4	4	4	4	5

표 5 ESS (PCS/battery) 조합

Table 5 Assumed ESS(PCS/battery) combinations

PCS(kW)	배터리(kWh)
1,000	1,000
	2,000
	3,000
	4,000
	5,000
	6,000

표 6 ESS 구성품 단가

Table 6 Assumed ESS item price

품목	단위	단가(원)
PCS	1MW	120,000,000
배터리	1MWh	330,000,000
PMS	.	50,000,000
계통연계형 변압기	1MW	50,000,000
공사비	1MWh	50,000,000

각 월의 부하패턴 특성이 반영된 피크저감량 산출을 위해, 한전에서 제공하는 iSMART을 활용하여 표 4의 2017년도 L쇼핑몰의 적용일수에 대한 평일 15분 단위의 최대수요 kW 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터를 바탕으로 실루엣기법을 활용하여 각 월에 2개의  $k$  클러스터 선정하였으며,  $k$ -means 클러스터링 알고리즘을 통하여 그림 2(a), (b), (c), (d), (e), (g), (h), (f), (i), (j), (k), (l)와 같이 월간 각각 2개의  $k$  클러스터로 분리되며, 각  $k$  클러스터의 거리차이의 분산이 최소화되는 곡선을 대표일로 선정하였다. 각월의 대표일 발생확률은 표 7과 같다.

표 7 각월의 대표일 발생확률

Table 7 Occurrence probabilities of representative days each month

월	발생확률 A(빨강)	발생확률 B(파랑)
1월	0.5	0.5
2월	0.3	0.7
3월	0.95	0.05
4월	0.95	0.05
5월	0.62	0.38
6월	0.43	0.57
7월	0.81	0.19
8월	0.57	0.43
9월	0.57	0.43
10월	0.76	0.24
11월	0.32	0.68
12월	0.47	0.53

5.3 제안된 피크저감량 선정

그림 2에 나타난 각 월의 대표일들과 표 7의 발생확률을 목적 함수 식 (2)에 대입 후 최적화된 ESS 일일 총·방전 운영 스케줄링을 이용하여 각월의 예상 총 절감액을 얻을 수 있다. 그림 3의 (a)는 ESS 1,000kW, 배터리 6,000kWh인 경우 피크저감량을 0kW에서 1kW씩 증가시켰을 때 각 월의 예상 총 절감액으로, 수용가 및 특례요금제를 통한 절감액의 합으로 구성된다. 봄, 가을철(black)과 겨울철(blue)의 예상 총 절감액은 연간 최대수요전력인 15,188kW 보다 낮아, 피크저감량이 증가할수록 수용가와 특례요금제 각각의 기본요금 및 전력량요금 상승분이 반영되어 증가 되었다. 반면 여름철(red)의 총 기대 절감액은 피크저감량이 159kW까지는 점점 증가되었으나, 159kW 이후 피크저감량 증가에 따라 중간부하시간대 ESS의 방전량 증가(최대부하 시간대 방전량 감소)로 인해 감소되었다. 심지어 7월의 피크저감량 675kW인 경우와 8월의 피크저감량 678kW인 경우, 피크저감 가능용량이 배터리 에너지 저장용량을 초과하여 시뮬레이션은 중지되었다. 그림 3의 (b)는 12개월간의 총 기대 절감액의 합이다. 즉, 피크저감량이 159kW에서 총 기대 절감액의 합이 가장 크며 본 논문에서는 이때 피크저감량을 ESS 초기투자비 회수기간 분석을 위한 피크저감량으로 결정하였다. 표 8은 PCS 용량이 1,000kW인 경우, 배터리 용량 증가에 따라 산출된 피크저감량이다. 시뮬레이션 결과 '20년 12월 31일(특례요금제 기본요금 3배) 이전, 배터리 용량이 1,000kWh, 2,000kWh, 3,000kWh, 4,000kWh, 5,000kWh, 6,000kWh인 경우, 피크저감량이 각각 25kW, 53kW, 80kW, 106kW, 130kW, 159kW일 때 총 기대 절감액이 가장 크게 나타났다. 또한 '20.12.31(특례요금제 기본요금 1배 또는 없음) 이후에는 특례요금제의 영향이 감소되며, 피크저감량 크기에 따른 수용가 기본요금 절감액이 반영되었다. 총 기대 절감액은 상기의 배터리 용량에 대해서, 피크저감량이 각각 260kW, 364kW, 455kW, 530kW, 604kW, 675kW, 604kW일 때 가장 크게 나타났다.

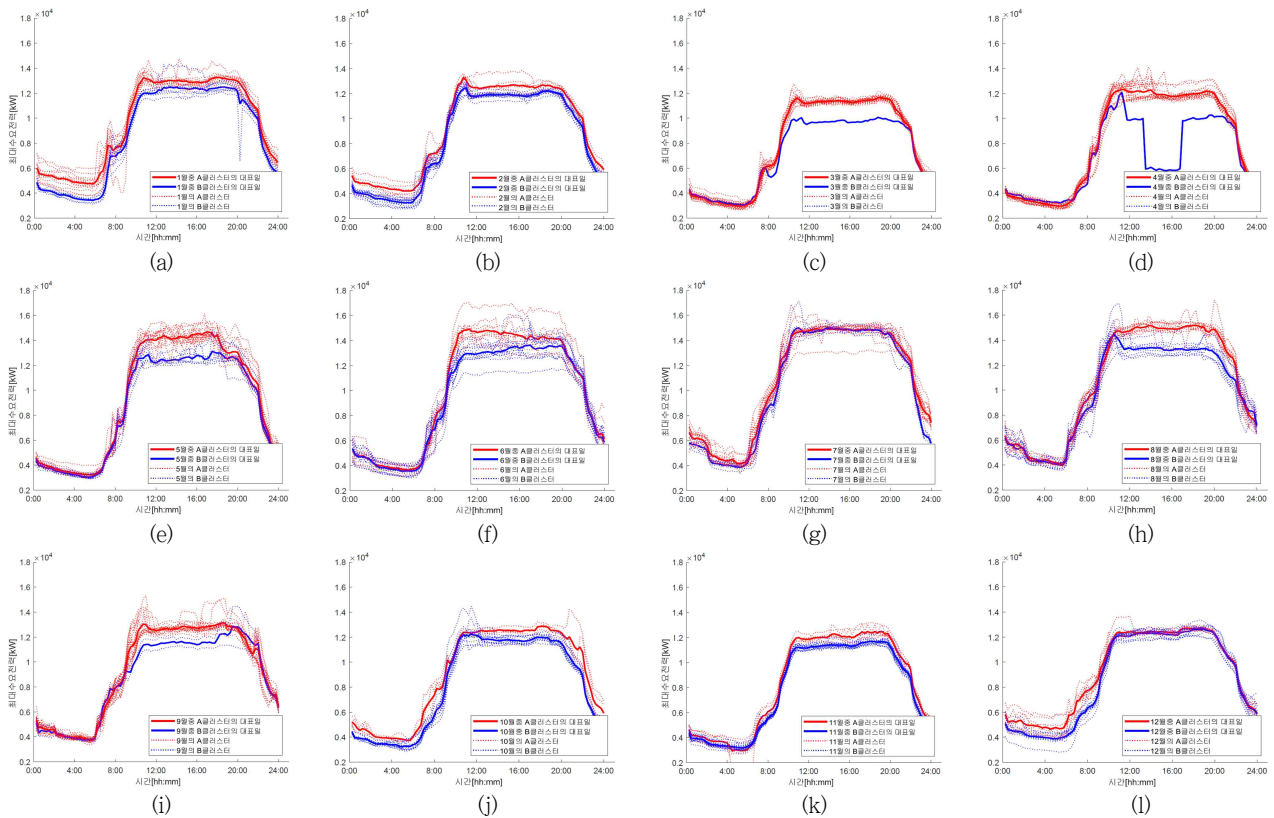


그림 2 각월의 2개 그룹과 그룹의 대표일 (a)1월 (b)2월 (c)3월 (d)4월 (e)5월 (f)6월 (g)7월 (h)8월 (i)9월 (j)10월 (k)11월 (l)12월  
**Fig. 2** Two clustering groups per month and their representative days (a)Jan. (b)Feb. (c)Mar. (d)Apr. (e)May. (f)Jun. (g) Jul. (h)Aug. (i)Sep. (j)Oct. (k)Nov. (l)Dec.

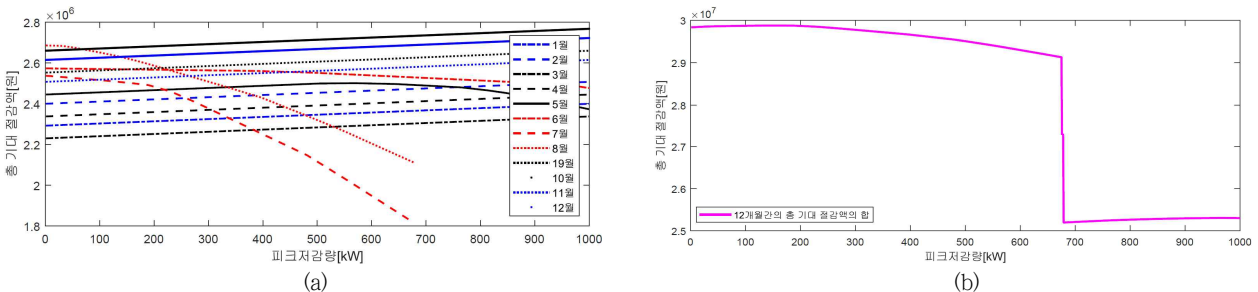


그림 3 대표일에 대한 피크저감량 결정(1,000kW/6,000kWh) (a)각월의 총 기대 절감액 (b)12개월 총 기대 절감액의 합  
**Fig. 3** Determination of peak reduction based on representative days(1,000kW/6,000kWh) (a)expected benefit costs of each month (b)sum of expected benefit costs for 12 months

**5.4 제안된 ESS 초기투자비 회수기간 분석**

상기의 5.3에서 산정된 피크저감량으로 표 6의 평일 및 토요일 적용일수와 표 8의 ESS 품목 단가를 식 (10)-(11)에 대입하여 ESS 초기투자비 회수기간을 산출하였다. 그림 4는 ESS 초기 투자비 회수기간 분석 결과인데, PCS와 배터리 조합이 각각 1,000kW/1,000kWh, 1,000kW/2,000kWh, 1,000kW/3,000kWh, 1,000kW/4,000kWh, 1,000kW/5,000 kWh, 1,000kW/6,000kWh인 경우, ESS 초기투자비 회수기간은 각각 82개월, 90개월, 76개월.

73개월, 75개월, 92개월로 분석되었다. 여기서, 배터리 용량이 1,000kW/ 6,000kWh인 경우, 배터리의 용량은 가장 크지만, 피크 저감을 위해 중간부하 또는 최대부하시간대 소모되는 배터리 방전량이 비례적으로 증가되어, 피크저감에 따른 기본요금 절감액 효과가 작으며, 중간부하시간에 배터리 방전량 증가로 전력량요금 차액이 감소되었다. 즉, L소핑물의 중간부하/최대부하시간대에 완만한 곡선의 부하패턴 특성이 반영된 결과이다.

한편 배터리 용량이 1,000kW/5,000kWh인 경우, 1,000kW/6,000kWh보다 비록 피크저감 가능용량은 71kW만큼 작지만 투

표 8 ESS 조합에 대한 피크저감량

Table 8 Amount of peak reduction based on ESS combinations

PCS [KW]	배터리 [kWh]	피크저감량[kW] (2020년12월31일 이전)	피크저감량[kW] (2020년12월31일 이후)
1,000	1,000	25	260
	2,000	53	364
	3,000	80	455
	4,000	106	530
	5,000	130	604
	6,000	159	675

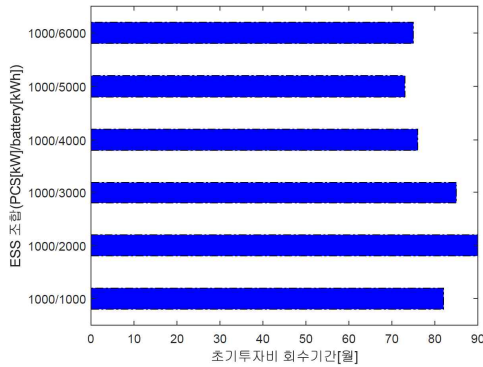


그림 4 배터리 용량 변경에 따른 ESS 초기투자비 회수기간

Fig. 4 Analysis of the initial cost payback period on ESS according to the battery capacities

자비가 3.3억원 감소되어 ESS 초기투자비 회수기간이 가장 단축되었다. 그림 5는 배터리 용량이 1,000kW/5,000kWh일 때, 7월의 대표일에 대한 ESS 일일 총·방전 스케줄링 결과이다. 총·방전 스케줄링은 특례요금제의 기본요금 3배까지 할인받을 수 있는 2020년 12월 31일 전·후로 나눌 수 있다. 그림 5(a)~(d)는 2020년 12월 31일 이전의 ESS 스케줄링 결과인데, 최대전력(15,012kW)은 최대수요전력(15,188kW) 보다 낮으며, 그림 5(b)와 같이 경부하시간대에 ESS는 충전을 통해 충전요금의 50%만큼 절감되며, 그림 5(c)와 같이 기본요금 3배 절감을 위해 최대부하 시간대인 14:00~17:00에 집중 방전되었다. 한편 2020년 12월 31일 이후에는 특례요금제의 기본요금 1배 또는 혜택을 받지 못하므로, 그림 5의 (a)', (b)', (c)', (d)와 같이 ESS는 피크저감에 따른 기본요금 절감을 위해서 중간부하 또는 최대부하시간대 방전되고 있다.

배터리 용량이 1,000kW/5,000kWh인 경우, 표 9의 시뮬레이션 조건과 같이 특례요금제만 고려한 경우와, 특례요금제와 피크저감을 고려한 경우 각각의 ESS 초기투자비 회수기간과 15년간 총 절감액을 비교 분석하였다. 표 10은 조건별 ESS 초기투자비 회수기간 산정 결과인데, Case 2(제한된 방법)가 Case 1(기존 방법)보다 피크저감에 따른 기본요금 절감액 증가로 총 4천 6백만원 절감되었고, 투자비 회수기간은 18개월 단축되었다.

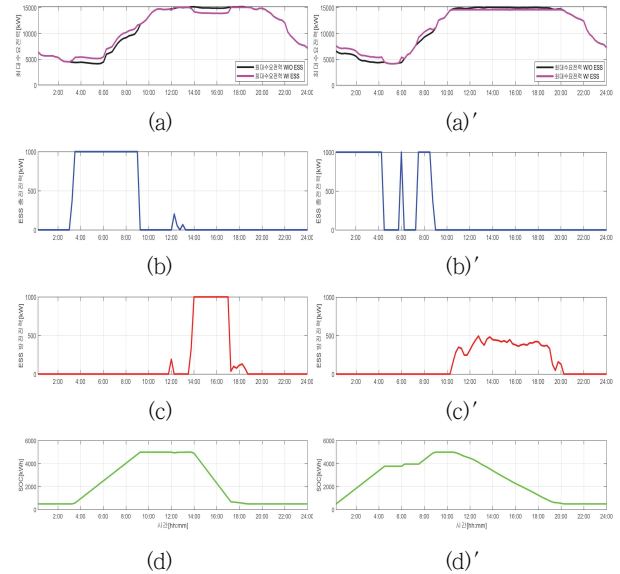


그림 5 대표일(7월)에 대한 ESS 일일 총·방전 스케줄링 (ESS 1,000kW/5,000kWh) (a) 최대수요 (b) 충전 (c) 방전 (d) 잔존용량('20.12.31 이전, 피크저감량: 130kW) (b)'최대수요 (b)'충전 (c)'방전 (d)'잔존용량('20.12.31 이후, 피크저감량: 604kW)

Fig. 5 ESS daily operation scheduling on representative day in Jul. (ESS 1,000kW/5,000kWh) (a) maximum demand (b) charge (c) discharge (d) SOC (~'20. 12.31, peak reduction: 130kW) (b)'maximum demand (b)'charge (c)' discharge (d)'SOC ('20.12.31~, peak reduction: 604kW)

표 9 시뮬레이션 사례

Table 9 Two simulation cases

분류	특례요금제	피크저감
사례1(기존 방법)	0	x
사례2(제한된 방법)	0	0

표 10 사례별 ESS 초기투자비 회수기간 산정 결과

Table 10 Initial cost payback periods for two cases

분류	15년간 총절감액[원]	투자비회수기간[월]
사례1 (기존 방법)	2,274,008,107	92(7년8개월)
사례2 (제한된 방법)	2,738,848,571	74(6년2개월)

## 6. 결 론

본 논문에서는 기존의 ESS 경제성 분석시, 적절한 피크저감 가능용량 산정의 어려움으로 특례요금제도만 고려하고 있으나 투자비 회수기간의 늘어나는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하

기 위해, 수용가의 ESS 충·방전 운전계획을 수립하여 피크저감과 특례요금제가 함께 고려된 새로운 ESS 경제성 분석 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 각 월의 전기사용 패턴이 적절히 반영된 피크저감 가능용량을 산정하기 위해서,  $k$ -means 클러스터링 알고리즘을 활용하여 각 월의 대표일을 결정하였으며 최대 PCS 용량까지 전수탐색 기법과 혼합정수선형 프로그래밍을 통해 얻은 모든 대표일의 예상 절감액을 바탕으로 피크저감량을 산정하였다.

(2) 한시적인 특례요금제 유·무에 따라 피크저감 변동분이 반영된 예상 절감액이 최대화가 되도록 각 월의 대표일에 대한 ESS 충·방전 운영 스케줄링을 수립하였다.

(3) 피크저감 용량과 특례요금제도가 함께 반영된 ESS 초기 투자비 회수기간은 특례요금제도만 고려된 투자비 회수기간 보다 18개월 단축시킬 수 있음을 확인하였다.

(4) 과거 피크일 기준으로 피크저감량이 산정되고 있으나 피크가 발생되지 않으면 투자초기에 이미 반영된 피크저감량에 따른 기본요금 절감 효과가 낮아 투자비 회수기간이 길게 되지만, 제안된 알고리즘은 효과적인 피크저감량 산정에 기여될 것이다.

(5) ESS는 여전히 고가임으로 국가정책인 ESS 특례요금제에 의존하고 있지만, 특례요금제도 이후 수용가의 부하패턴이 적절히 반영된 피크저감과 계시별 요금제를 바탕으로 한 ESS 투자비 회수기간과 사업 타당성 분석을 통해 합리적인 사업제안이 가능하다.

## References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, "8th Basic Plan for Electricity Supply and Demand".
- [2] Korea Energy Agency, RPS support system [Internet]. Available From: [http://rps.kemco.or.kr/Biz\\_01/O1\\_01/O1\\_01\\_01\\_012.aspx](http://rps.kemco.or.kr/Biz_01/O1_01/O1_01_01_012.aspx).
- [3] Korea Power Exchange, Korea Electric Power Corporation, Korea Energy Agency, "one-stop business information portal for renewable energy" [Internet]. Available From: <http://onrec.kmos.kr/portal/index.do>.
- [4] Y. B. Lee, J. H. Kim, "Economic Feasibility of Energy Storage System connected with Solar/Wind Power Generation", Energy Engineering, Vol. 28, No. 3 pp. 74-81, Sep. 2015.
- [5] The National Law Information Center, "Regulation on the Promotion of Rational Use of Energy by Public Agencies", [Internet]. Available From: <http://www.law.go.kr/행정규칙/공공기관에너지이용합리화추진에관한규정>.
- [6] Korea Smart Grid Association, "Information on changes in ESS Special Tariff", [Internet]. Available From: [http://www.ksga.org/eng/sub1/notice\\_read.asp?ID=1122](http://www.ksga.org/eng/sub1/notice_read.asp?ID=1122).
- [7] KEPCO, "The enforcement of Standard Terms and Conditions for a ESS Special Tariff", [Internet]. Available From:<http://blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=dgs505>

&logNo=221227749460&parentCategoryNo=&categoryNo=37&viewDate=&isShowPopularPosts=true&from=search.

- [8] KEPCO, "Power Portal Service", [Internet]. Available From: <https://pccs.kepco.co.kr/>.
- [9] Kaufman L., and P. J. Rousseeuw. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [10] Arthur, David, and Sergi Vassilvitskii. "K-means++: The Advantages of Careful Seeding," *SODA '07: Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 2007, pp. 1027- 1035.

## 저 자 소 개



### 손 준 호 (Joon-Ho Son)

2009년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과(공학사). 2011년 8월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과(공학석사). 2016년 12월 : 일본 북해도대학교 대학원 정보과학연구과(공학박사). 2016년 12월~현재 : LG전자 ESS 사업부 ESS영업/엔지니어링팀 재직. <관심분야> 전력/배전계통 해석, ESS/분산전원 최적운영, 수요자원거래시장