

# ESS의 Peak-Shaving 운용 알고리즘 개발 연구

이성준<sup>1†</sup>, 백종복<sup>2</sup>, 강모세<sup>2</sup>

조선대학교 기계시스템미래자동차공학부<sup>1</sup>, 한국에너지기술연구원<sup>2</sup>

## A Study on Development of Peak-Shaving Operation Algorithm for Energy Storage System

Seongjun Lee<sup>1†</sup>, Jongbok Baek<sup>2</sup>, Mose Kang<sup>2</sup>

Chosun University<sup>1</sup>, Korea Institute of Energy Research<sup>2</sup>

### ABSTRACT

본 논문에서는 ESS를 이용한 전력 계통의 Peak-Shaving 제어 알고리즘 수립에 대한 연구 결과를 제시한다. 과거의 요일별 전력수요 데이터를 이용하는 경우 ESS가 포함된 전력 시스템의 연결점(PCC)에서 전력 및 에너지 평형 방정식을 수립할 수 있고, ESS의 전력 및 에너지 용량에 따른 전기요금 최소화를 목적 함수로 한 선형 계획법 문제를 정식화할 수 있다. 선형 계획법 문제 해결을 통해 ESS가 추가되는 경우에 대한 경제성을 분석할 수 있고, 이로부터 ESS의 적합한 용량도 선정할 수 있다. 또한 부하 크기 및 시간대별 ESS 최적 전력 이용 패턴을 확인할 수 있기 때문에 실 운용 로직 설계를 위한 가이드로 결과를 활용할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 방법을 설명하기 위한 일 예시로서, 시간대별 전력 부하 패턴의 기존 연구 결과로부터 도출한 부하 전력 곡선을 이용하여 선형 계획법을 이용한 Peak-Shaving 최적 제어 결과를 제시하고, 이를 기반으로 실시간 운전 가능한 규칙 기반 알고리즘을 설계하여 ESS의 적용에 따른 요금 절감 효과를 제시한다.

### 1. 서 론

최근 신재생 에너지 발전 및 전력 품질에 대한 중요성이 대두되고 있어, 전력 계통의 안정적이고 효율적인 운영을 위해 ESS(Energy Storage System)를 이용한 신재생 출력 안정화, 주파수 제어(frequency regulation) 및 첨두부하를 저감(Peak-shaving) 할 수 있는 알고리즘에 대한 연구 및 실증 평가가 진행되고 있다. ESS의 기능 중에서 Peak-Shaving은 ESS에 포함된 배터리를 이용하여 하루 중 최소 부하 시간대에 남은 잉여 에너지를 배터리에 저장시켰다가 전력 피크 발생 시간대에 에너지를 방전 시킴으로써 에너지 이용률을 향상시키면서 소비자 입장에서는 전기 요금을 절감시킬 수 있는 역할을 한다.

전력 계통에 ESS를 적용하기 위해서는 설치될 곳의 설비 및 설치 목적을 고려해야 한다. 특히 Peak-shaving을 위한 최적 알고리즘 구성을 위해서는 과거 부하에 대한 패턴 분석은 필수적이고, 이를 기반으로 ESS의 최적 알고리즘 설계를 위한 접근 방법에 대한 연구가 중요하다. 기존에는 신재생 에너지와 ESS가 연계된 시스템에서 자본비용, 운용 유지비용 등을 고려한 목적함수를 최적화하기 위한 연구가 진행되었으나 제어 로직에 대한 설계 방법이 제시되지 않았다[1]. 또한 계절 및 시간대별 요금이 다른 산업용 전기요금 체계를 적용하여 ESS의 에너지를 최대 효율하여 기본 요금 및 사용량 요금을 저감시킬 수 있는 연구는 거의 제시되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 과거의 연간 부하 패턴을 기반으로 산업용에 적용될 수 있는 ESS의 Peak-Shaving 알고리즘에

대한 연구를 진행한다. 먼저 최적 전력분배 결과에 대한 경제성 분석 및 운영 알고리즘 수립에 활용되는 선형계획법 모형 수립과 실시간 알고리즘 설계에 대한 내용을 다루고, 이후에 제안한 운용 알고리즘을 적용했을 때의 모의실험 결과를 제시함으로써 ESS 적용에 따른 요금 절감 효과를 분석한다.

### 2. ESS 시스템 모델링

#### 2.1 선형계획법 모델

ESS의 Peak-shaving 기능 구현을 위한 전력 및 에너지 운용전략 수립 및 기능 적용에 따른 경제성 분석을 위해 그림 1과 같은 시스템의 전력 및 에너지에 대한 선형방정식 및 제약 조건을 수립하고 이를 표 1에 나타낸다. 표 1의 연속함수를 이산 시간 방정식으로 변경하여 Matlab 소프트웨어를 이용하여 심플렉스(Simplex)법으로 선형계획법 최적화 문제를 풀이할 수 있다.

#### 2.2 Peak-Shaving 알고리즘 설계

본 연구에서는 산업용에 적용되는 ESS를 위한 계절, 시간별 요금제를 고려한 Peak-shaving 알고리즘을 설계한다. 이때

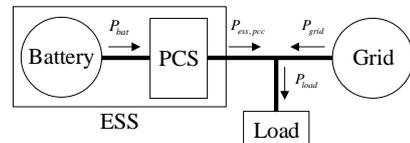


그림 1. ESS의 구성도

표 1. 선형계획법 목적함수 및 제약조건

Objective function :	
$\min_x f(x) = C_{off-peak} \int_{off-peak} P_{grid} dt + C_{mid} \int_{mid} P_{grid} dt + C_{peak} \int_{peak} P_{grid} dt$	
Constraints:	
$P_{ess}(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t)$	
$E_{ess} = \begin{cases} -\int \frac{P_{ess}(t)}{\eta_{bat}\eta_{pcs}} dt & P_{ess}(t) \geq 0 \\ -\int \eta_{bat}\eta_{pcs} P_{ess}(t) dt & P_{ess}(t) < 0 \end{cases}$	
$E_{grid} = \int P_{grid} dt$	
$P_{grid} \leq \text{slew rate up}$	
$P_{grid} \geq \text{slew rate down}$	
$P_{ess} \leq P_{ess,max}$	
$P_{ess} \geq P_{ess,min}$	
$P_{grid} \leq P_{grid,max}$	
$P_{grid} \leq P_{grid,min}$	
$E_{ess}(t_0) = E_{ess}(t_f)$	
<ul style="list-style-type: none"> <li>. <math>C_{off-peak}, C_{mid}, C_{peak}</math></li> <li>. Coefficients for Energy Charge (won/kWh)</li> <li>. <math>P_{ess}</math> : ESS power</li> <li>. <math>P_{grid}</math> : Grid power</li> <li>. <math>P_{load}</math> : Load power</li> <li>. <math>E_{ess}</math> : Battery Energy (<math>\approx</math> SOC)</li> <li>. <math>E_{grid}</math> : Consumed energy from the grid</li> <li>. <math>\eta_{pcs}, \eta_{bat}</math> : Efficiency of PCS and battery</li> </ul>	

알고리즘은 선형계획법의 최적 전력 분배된 결과를 모사할 수 있도록 과거 부하데이터, 시간 및 배터리의 상태를 입력으로 하고, 출력은 ESS가 충방전해야 할 전력의 크기로 하였다. 설계된 Peak-shaving 운용 로직은 그림 2와 같고, 그림 3의 Matlab/Simulink의 알고리즘 블록에 적용되어 기능 및 성능이 검증되었다. 그림 3의 Cost Model은 산업용-을 전기요금 체계를 반영한 모델링 블록이다.

### 3. 모의실험 결과

모의실험을 위한 부하 데이터는 [2]에서 제시한 일별·시간대별 전력 부하패턴 분석의 결과를 이용하였다. 각 월별 1주간의 정규화된 부하 전력이 제공되고 있으므로, 각 월의 1주간 데이터를 800배 증대시켜 최대 전력이 950kW급인 부하 데이터를 생성하였다. ESS는 생성된 부하의 평균 및 최대-최소 전력을 고려하여 전력용량을 결정하였고, 에너지는 1MWh로 고정하였다.

그림 4 (a)는 선형계획법으로 풀이된 1년 동안의 부하 전력에 대한 ESS와 계통의 최적 전력 공급 결과를 나타낸다. 1월 첫주를 확대한 그림 4 (b)의 결과를 볼 때 ESS는 최대부하 시간대에 사용 가능한 에너지를 방전시키고, 최소부하 시간대에 방전된 에너지를 충전시키는 제어를 수행한다. 중간부하 시간대는 최대부하 시간대에 방전할 에너지 확보를 위해 주로 배터리를 충전시키는 제어를 수행하거나 에너지를 공급하지 않고 대기하도록 한다.

그림 5는 본 논문에서 제안하는 Peak-shaving 알고리즘을 적용한 연간 결과와 1월 첫째 주의 결과를 나타낸다. ESS가 최대 전력 및 최대 이용가능 에너지로 충-방전 운전되지 않는 것은 부하 전력의 불확실성을 대비하기 위한 규칙제어 전략에 따른 것이다. 그림 6은 부하 패턴이 과거 데이터와 유사한 경우에 대해서 ESS를 적용하는 경우의 경제성을 나타낸 결과로서 ESS의 전기요금 할인제도를 적용하는 경우 연간 19%의 비용 절감이 가능한 것으로 분석되었다.

### 4. 결론

본 논문에서는 ESS의 Peak-Shaving 제어 알고리즘을 수립하기 위한 방법을 제시하였다. 하루 동안 ESS에 포함된 배터리의 에너지 평형을 유지시키면서 전기요금을 최소화시키기 위한 선형계획법 문제를 풀이하여 최적해를 도출하고 이를 제어 알고리즘 수립에 활용하였다. 제안된 방법은 첨두 부하 저감을 위한 알고리즘 설계뿐만 아니라 ESS 적용 환경에 따른 최적 용량을 선정하는데 활용될 수 있다. 향후 배터리의 수명을 고려한 경제성 효과 및 운영 알고리즘 연구를 추가적으로 진행할 예정이다.

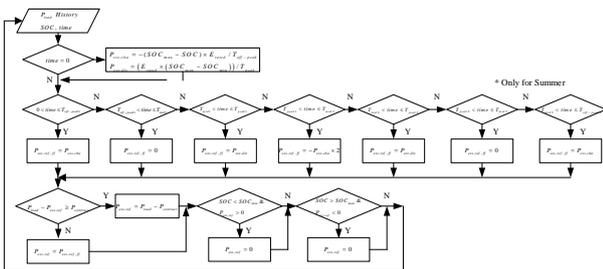


그림 2. ESS Peak-Shaving 운영 전략

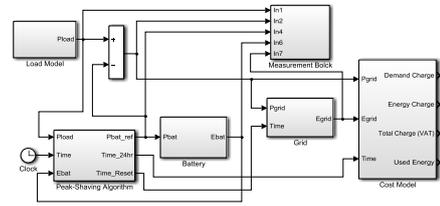
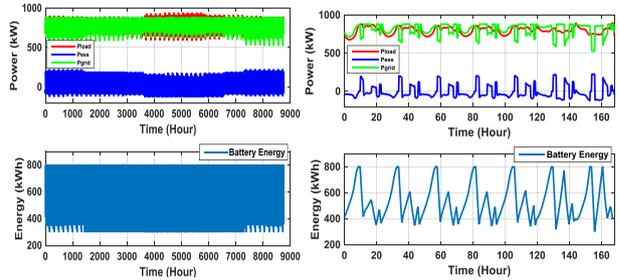
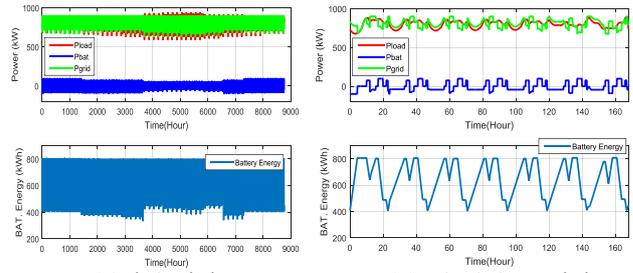


그림 3. Peak-shaving 알고리즘 개발을 위한 소프트웨어모델



(a)연간 결과 (b)1월 첫째 주 결과

그림 4. 선형계획법을 이용한 최적 전력/에너지 운용 결과



(a)연간 결과 (b)1월 첫째 주 결과

그림 5. ESS 운영 전략에 따른 전력/에너지 운용 결과

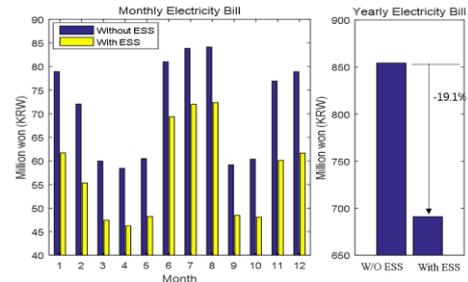


그림 6. 전기요금 절감 효과

### 감사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20182410105280)  
이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.NRF-2017R1C1B5017415)

### 참고 문헌

- [1] 이나은, 김옥원, 김진오. "신재생 에너지가 도입된 전력저장장치의 첨두부하절감 효과를 고려한 최적 구성 알고리즘", 전기학회논문지, 63(9), 1199-1205.
- [2] 김철현. "일별·시간대별 전력 부하패턴 분석", 에너지경제연구원 수시연구보고서, 2013.