

전기요금 절감용 ESS를 활용한 Particle Swarm Optimization 기반 Peak Shaving 제어 방법

Particle Swarm Optimization-Based Peak Shaving Scheme Using ESS for Reducing Electricity Tariff

박 명 우*, 강 모 세**, 윤 용 운*, 홍 선 리**, 배 국 열**, 백 중 복**★

Myoung Woo Park*, Moses Kang**, YongWoon Yun*, Seonri Hong**, KUK YEOL BAE**, Jongbok Baek**★

Abstract

This paper proposes a particle swarm optimization (PSO)-based peak shaving scheme using energy storage system (ESS) for electricity tariff reduction. The proposed scheme compares the actual load with the estimated load consumption, calculates the additional output power that the ESS needs to discharge additionally to reduce peak load, and adds the input. In addition, in order to compensate for the additional power, the process of allocating power to the determined point is performed, and an optimization that minimizes the average of the load expected at the active power allocations using PSO so that the allocated value does not affect the peak load. To investigate the performance of the proposed scheme, case study of small and large load prediction errors was conducted by reflecting actual load data and load prediction algorithm. As a result, when the proposed scheme is performed with the ESS charge and discharge control to reduce electricity tariff, even when the load prediction error is large, the peak load is successfully reduced, and the peak load reduction effect of 17.8% and electricity tariff reduction effect of 6.02% is shown.

요 약

본 논문에서는 전기요금 절감용 ESS를 활용한 Particle swarm optimization(PSO) 기반 Peak shaving 제어 방법을 제안한다. 제안한 방식은 실제 부하와 예상되는 부하의 소비를 비교하여 피크 절감을 위해 ESS의 추가 유효전력값을 계산하여 입력을 더한다. 또한 추가로 증가시킨 유효전력을 보상하기 위해, 유효전력을 할당하는 과정을 수행하며 유효전력 할당치가 피크 부하에 영향을 주지 않도록 유효전력 할당 지점에 예상되는 부하의 평균을 최소화하는 최적화 해를 PSO를 통해 찾는다. 제안한 방식의 성능 검증을 위해 실제 부하 데이터와 예측 알고리즘을 반영하여 예측 오차가 적은 경우와 큰 경우의 사례 연구를 수행하였다. 사례 연구 수행 결과 제안한 방식을 전기요금 절감을 위한 충·방전 제어 방식과 같이 수행한 경우 예측 오차가 큰 경우에도 성공적으로 피크 부하 절감을 수행하였으며, 17.8%의 피크 부하 절감 효과와 6.02%의 전기요금 절감 효과를 보였다.

Key words : Peak shaving, Electricity tariff saving, particle swarm optimization, energy storage system, peak load reduction

* Dept. of Computer Engineering, Korea University of Technology and Education

** Dept. of Electrical Engineering, Korea Institute of Energy Research

★ Corresponding author

E-mail : jongbok.beak@kier.re.kr, Tel : +82-42-860-3575

※ Acknowledgment

This work was conducted under framework of the research and development program of the Korea institute of energy research (C1-2420) and Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea. (No. 20172410104720)

Manuscript received May. 17, 2021; revised Jun, 23, 2021; accepted Jun. 23, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

최근 우리나라의 전력 사용량이 꾸준히 상승하여, 지난 2018년 8월에는 약 50 GWh의 전력량 소비를 보였다[1]. 이처럼, 우리나라의 전력 사용량이 증가함과 동시에 수용가 측의 피크 부하도 증가하고 있다. 특히 여름철 급격한 폭염으로 인한 에어컨 사용 등으로 전력 사용량이 급격히 증가하고 있으며 수요예측 오차가 증가함에 따라 최대부하 시간대에 전력수급난이 발생하고 있다. 이에 따라, 기후변화 기반 수요예측 정확도를 높이고 수용가 측에서 Peak shaving을 통한 피크 부하 절감 방안이 지속적으로 연구되고 있다[2-5].

수용가에서는 전기요금 절감 효과를 위해 Energy storage system(ESS)를 사용하고 있다. 특히, 2020년 까지 ESS 보급을 높이기 위한 ESS 활용촉진요금제 등의 특별요금제에 따라 수용가측에서 사용하는 ESS의 수가 크게 늘었다. 이러한 ESS 보급에 맞추어 수용가 측에서 ESS를 활용하여 다양한 어플리케이션을 적용하고 있다. 그림 1은 수용가 측의 다양한 ESS 어플리케이션 예시를 보여준다[6].

ESS를 활용한 전기요금 절감 효과는 일반적으로 시간대 사용(Time-of-Use, TOU) 요금 방식에 따라 경부하 시간대 충전과 최대부하 시간대 방전을 통한 시세 차익 거래로 전기요금 절감 효과를 보인다[7]. 또한, 전기요금 절감 효과를 극대화하기 위해 전기요금 최소화 목적함수를 통한 최적 제어 방법도 적용한다[8-10]. 위 방법은 기본요금과 전력량요금을 최소화 하도록 목적함수를 세우고, ESS의 용량, SOC 유지 등의 제약조건을 통해 피크 절감과 동시에 차익 거래를 통한 전기요금 최소화를 하는 방안이며 부하 예측값을 입력으로 한다. 따라서, 부하 예측 오차가 작은 부하에서는 위 방식을 적용할 경우 전기요금 절감 뿐만 아니라 피크부하를 감소시키는 효과도 볼 수 있다. 그러나, 부하 예측 오차가 큰 경우 전기요금은 줄일 수 있지만 피크 감소 등의 효과를 보기 어려울 수 있다. 특히, 실제 부하의 피크가 중간부하 시간대에서 발생하였으나, 이를 예측하지 못한 경우 충·방전 제어 알고리즘은 중간부하 시간대에 충전을 수행하게 되며 이에 따라 전기 요금 절감을 위해 오히려 피크를 증가시키는 문제를 발생 시킬 수 있다. 이러한 문제를 방지하기 위해 ESS 최적 충·방전 제어

알고리즘을 수행함과 동시에 실시간으로 피크부하를 추적하여 위의 현상을 방지하는 Peak shaving 제어가 수행되어야 한다.

본 논문에서는 전기요금 절감용 ESS를 활용한 Particle swarm optimization(PSO) 기반 Peak shaving 제어 방법을 제안한다. 제안한 방식은 ESS의 충·방전 제어 수행 중에 ESS의 운전범위 및 SOC를 안전 범위 내에서 운전하면서 실제 부하의 피크를 감소시키는 것을 목적으로 한다. 이를 달성하기 위해 제안한 알고리즘은 실제 부하와 예상되는 부하의 소비를 비교하여 피크 절감을 위해 ESS가 추가로 방전해야하는 추가 유효전력값을 계산하여 입력을 더한다. 또한 추가로 증가시킨 유효전력을 보상하기 위해, 유효전력을 결정한 지점까지 할당하는 과정을 수행하며 이때 유효전력 할당치가 피크 부하에 영향을 주지 않도록 PSO를 통해 최적의 할당치를 산정한다. 제안한 방식의 성능 검증을 위해 실제 부하 데이터와 부하 예측 알고리즘을 반영하여 부하 예측 오차가 적은 경우와 예측 오차가 큰 경우의 사례 연구를 수행하였다. 또한, 1년간 월별 피크 절감 효과와 전기요금절감 효과 등을 확인하여 제안한 방식의 성능을 검증하였다. 사례 연구 수행 결과 제안한 방식을 전기요금 절감을 위한 ESS 충·방전 제어 방식과 같이 수행한 경우 부하 예측 오차가 큰 경우에도 성공적으로 피크부하 절감을 수행하였으며, 최대 17.8%의 피크 부하 절감 효과와 6.02%의 전기요금 절감 효과를 보였다.

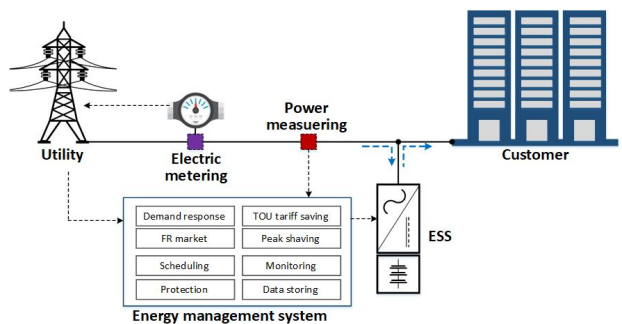


Fig. 1. Various applications for ESS in customer.
그림 1. 수용가 측의 다양한 ESS 어플리케이션

II. 전기요금 절감을 위한 ESS의 제어방법과 한계점

빌딩이나 공장 등 계절별/시간대별 요금제가 적

용되는 수용가에서는 전기요금을 절감하기 위한 계시별 요금제 기반 ESS 제어방식을 사용할 수 있다. 또한, 제어방식을 고도화하여 전기요금 최소화를 목적으로 하는 최적화 솔루션 기반 제어기법을 사용하여 전기 요금 감소 효과를 높일 수 있다.

본 절에서는 일반적인 계시별 요금제를 설명하고, 전기요금을 최적으로 감소시킬 수 있는 ESS 최적 충·방전 제어 알고리즘과 이를 위한 요소기술인 부하예측 기법을 설명한다. 또한, 충·방전 제어 알고리즘의 한계점을 찾고 이를 해결하기 위한 방안을 제시한다.

1. 계절별/시간대별 요금제

수용가에 부과되는 소비전력량에 대한 전기요금은 기본요금과 전력량요금으로 나눌 수 있다. 기본요금은 kW(계약전력) 당 요금률로 정의할 수 있으며, 전력량요금은 kWh(사용전력량) 당 요금률로 정의할 수 있다. 이 때, 전력량요금은 계절, 시간대별로 사용하는 적용요율이 달라지는 TOU 요금방식이 적용된다. 표 1은 일반용전력(갑)II의 전기요금표를 나타내며, 선택 1과 선택 2의 기본요금과 전력량요금을 확인할 수 있다.

Table 1. Electricity tariff table for general tariff (A) II.

표 1. 일반용전력(갑)II의 전기요금표

Options	Demand Charge (won/kW)	Energy Charge(won/kWh)			
		Use time	Summer	Spring/Fall	Winter
A	Option I 7,170	Off-peak	62.7	62.7	71.4
		Part-peak	113.9	70.1	101.8
		Peak	136.4	81.4	116.6
	Option II 8,230	Off-peak	57.4	57.4	66.1
		Part-peak	108.6	64.8	96.5
		Peak	131.1	76.1	111.3

Table 2. use-time of season.

표 2. 계절별 시간대별 구분표

Season Use time	Summer	Spring/Fall	Winter
Off-peak	23:00~09:00	23:00~09:00	23:00~09:00
Park-peak	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
Peak	10:00~12:00	10:00~12:00	10:00~12:00
	13:00~17:00	13:00~17:00	17:00~20:00 22:00~23:00

2. 전기요금 절감을 위한 ESS의 최적 충·방전 제어 알고리즘

전기요금 절감을 위한 ESS의 충·방전 제어 알고리즘은 기본요금과 전력량요금 최소화를 목적으로 하는 목적함수를 정의[10]하고, ESS의 용량과 충전 상태(State of Charge, SOC) 유지[11, 12] 등의 제약조건을 고려한다. ESS 충·방전 제어 적용 시 기본요금에 대한 목적함수는 다음 식 (1)과 같다.

$$\min \sum_{m=1}^M C_{base} \times \max(L^m + P_{ESS}^m), \forall m \quad (1)$$

여기서 m , C_{base} , L^m , P_{ESS}^m 는 각각 개월 수, 기본요금율, m 개월의 부하, m 개월의 ESS 출력값이다.

기본요금은 1개월의 부하의 최대값 [kW]과 기본요금율의 곱을 산정함을 가정한다.

ESS의 충·방전 제어 적용 시 전력량요금에 대한 목적함수는 다음 식 (2)와 같다.

$$\min \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [C^{n,t} \times (L^{n,t} + P_{ESS}^{n,t})], \forall n, \forall t \quad (2)$$

여기서 n , t , $C^{n,t}$, $L^{n,t}$, $P_{ESS}^{n,t}$ 는 각각 일 수, 시간, 시간대별 전력량요금율, 시간대별 부하, 시간대별 ESS 출력값이다. 전력량요금은 계절별/시간대별 상황에 따라 요금율이 다르게 적용된다. 또한, ESS 활용촉진요금제와 같은 특별 요금제는 적용되지 않는 것을 가정한다.

위 식 (1)과 식 (2)의 목적함수에 대한 제약조건은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} y \times P_{ESS}^{\min} &\leq P_{ESS}^{n,t} \leq z \times P_{ESS}^{\max} \\ 0 < y + z &\leq 1 \\ SOC^{\min} &\leq SOC^t \leq SOC^{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

$$SOC^{t+1} = SOC^t + \eta_{cha} \times \frac{P_{ESS}^t}{C_{ESS}} - \eta_{dis} \times \frac{P_{ESS}^t}{C_{ESS}}$$

위 제약조건에서 P_{ESS}^{\min} , P_{ESS}^{\max} 는 각각 ESS의 최소 출력값과 최대 출력값을 의미한다. 또한, SOC^{\min} , SOC^{\max} , SOC^t , C_{ESS} 는 각각 ESS의 최소 SOC, 최대 SOC, t 시간대의 SOC, ESS의 용량을 의미한다. $t+1$ 시간대의 SOC는 t 시간대의 ESS 출력값과 t 시간대의 SOC에 따라 결정된다. 따라서, 최적화 문제를 수행하기 위해서는 SOC 초기값을 함께 정의해야 한다. 본 논문에서 수행하는 ESS

최적 충·방전 제어 알고리즘에서 최적화 문제를 수행할 때 SOC 초기값은 SOC^{min} 으로 설정하였다. 또한, 만약 t 시간의 간격이 1시간 주기가 아닌 다른 주기를 가진다면, 용량의 단위가 kWh 임에 따라 하루 단위 24시간을 주기로 나눈 값을 곱하여 SOC^{t+1} 가 계산되어야 한다.

SOC 연산 제약 조건에서 ESS의 충전효율과 방전효율을 다르게 적용해야 하는 경우, $P^{n,t}_{ESS}$ 의 부호에 따라 충전효율과 방전효율을 바꿔 SOC가 연산되어야 하기 때문에, 일반적으로 최적화의 목적함수가 convex한 형태를 가지고 있을 때 사용되는 Quadratic Programming 기법을 사용하기에 한계가 있다. 따라서, 위 제약조건에서 충전과 방전의 상태를 확인하는 정수 y, z 를 새로운 변수로 설정하고 이를 최적화에 활용하기 위해 Mixed Integer Linear Programming [13]을 사용한다.

3. 종합분석법 기반 부하예측

회귀분석기법, 시계열분석기법, 인공지능 기반의 분석기법 등 다양한 방식의 부하예측 기법이 존재하며 부하의 특성과 예측 방식에 따라 예측 오차가 달라진다[14, 15]. 전기요금 절감을 위한 ESS 충·방전 제어 알고리즘은 한 달 단위의 부하예측을 입력으로 하며, 본 논문에서는 부하 예측 기법 중 단기 전력수요 예측에 일반적으로 사용되는 종합분석법을 적용하여 부하예측을 수행한다.

그림 2는 종합분석법을 적용한 부하예측 알고리즘 순서도를 보여준다. 먼저, 예측일과 동일한 요일의 최근 3주의 전력사용패턴을 입력데이터로 선정한 후 식 (4)와 같이 지수평활화법을 적용하여 예측일의 최대·최소 전력 사용량을 예측한다.

$$\hat{x}_k = \alpha x_{k-1} + \alpha(1-\alpha)x_{k-2} + \alpha(1-\alpha)^2 x_{k-3} + (1-\alpha)^3 \frac{x_{k-1} + x_{k-2} + x_{k-3}}{3} \quad (4)$$

이를 통해 얻은 예측된 최대·최소 전력 사용량을 기준으로 하루 단위의 전체 예측값을 정규화한다. 마지막으로 예측일의 최대·최소 전력수요 예측값과 예측일의 하루 단위 정규화 전력수요 패턴 예측을 이용하여 최종적으로 예측일의 시간대별 전력수요값을 예측한다.

ESS 충·방전 제어 알고리즘을 통해 얻은 결과는 II-2 절에서 설명한 것과 같이 ESS의 출력 지령

값, P_{ESS} ,이며, 이를 도출하기 위해 필요한 입력은 부하예측값 데이터와 기본요금 및 계절별/시간대별로 변화하는 전력량요금율이다. 부하예측값에 따라 $P^{n,t}_{ESS}$ 의 값이 결정되기 때문에, 부하예측값과 실제부하값의 오차에 따라 ESS 충·방전 제어의 성능이 크게 달라질 수 있다. 특히, 수용가측의 부하가 피크부하 지점에 가까워지는 시점에서 예측 오차가 크게 발생할 경우 ESS는 오히려 부하를 줄이기 위해 방전을 해야 하는 상황에도 불구하고 충전을 하여 부하의 피크를 더 크게 만드는 심각한 상황도 초래할 수 있다. 따라서, ESS 최적 충·방전 제어 알고리즘을 수행함과 동시에 실시간으로 피크부하를 추적하여 위의 현상을 방지하는 Peak shaving 제어가 수행되어야 한다.

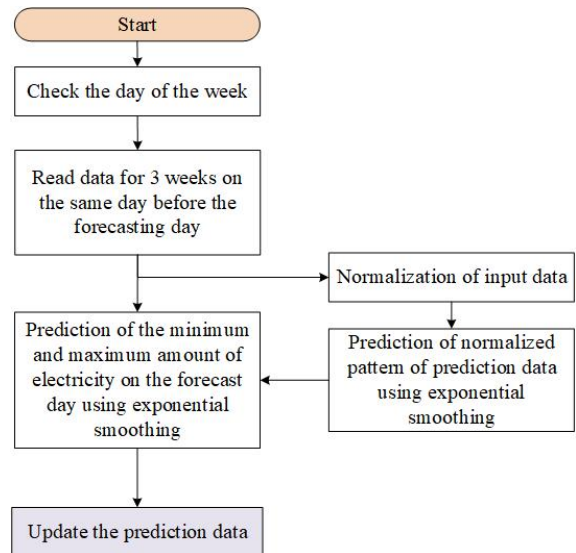


Fig. 2. Flowchart for load prediction algorithm applying comprehensive analysis method.

그림 2. 종합분석법을 적용한 부하예측 알고리즘의 순서도

III. 수용가측 부하의 피크저감을 위한 PSO 기반 Peak Shaving 제어

본 논문에서는 전기요금 절감을 위한 ESS의 충·방전 제어가 수행되면서 부하 예측 오차에 의한 피크 발생 문제 등을 방지하기 위한 PSO 기반의 Peak shaving 제어를 제안한다. 제안한 방식의 목적은 ESS의 충·방전 제어 수행 중에 ESS의 운전범위 및 SOC를 안전 범위 내에서 운전하면서 실제 부하의 피크를 감소시키는 것이다. 이를 달성하기 위해 제안한 알고리즘은 전기요금 절감을 위한 ESS의

운전 지령과 현재 소비부하의 크기를 입력으로 받아 이를 예상되는 피크부하와 비교하고 그보다 큰 값으로 산정될 경우 ESS가 추가적으로 방전해야 하는 추가 유효전력값을 계산하여 입력을 더한다. 이 때, ESS의 SOC를 고려하여 출력을 낼 수 있는 안정적인 범위 내에서 추가 유효전력을 산정한다. 다음으로, 추가로 증가시킨 유효전력을 보상하기 위하여 피크 부하에 영향을 주지 않는 시점으로 유효전력을 할당하며, 피크 부하에 영향을 주지 않도록 PSO 기법[16]을 사용해 할당을 최적화한다.

1. ESS 상태를 고려한 피크 부하 감소 방법

그림 3은 제안한 Peak shaving 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 제안한 알고리즘은 전기요금 절감을 위한 ESS의 운전 지령을 입력으로 한다. 또한, 현재 소비부하의 크기를 Energy Management System으로부터 받는다. Peak shaving을 수행하기 위해서 식 (5)와 같이 ESS의 운전 지령과 현재 소비부하 및 제안한 방식으로부터 할당된 추가 유효전력의 합이 예측되는 피크부하보다 큰 값을 가지는 지 지속적인 비교를 하며, 큰 값을 가질 경우 피크를 감소시키기 위한 추가적인 유효전력, ΔP_{PS} ,를 계산한다.

$$\Delta P_{PS} = L_{real} + P_{ESS} + \Delta P_{allo} - L_{est}^{max} \quad (5)$$

,if $L_{real} + P_{ESS} + \Delta P_{allo} \geq L_{est}^{max}$

위 수식에서, L_{real} , P_{ESS} , ΔP_{allo} , L_{est}^{max} 는 각각 현재 소비부하의 크기, ESS 유효전력 지령값, 할당된

ESS의 추가 유효전력 지령값, 예측된 피크부하를 나타낸다. 반면, ESS의 운전 지령과 현재 소비부하 및 제안한 방식으로부터 할당된 추가 유효전력의 합이 예측되는 피크부하보다 작은 값을 가지는 경우에는 ESS의 운전 지령을 그대로 사용한다.

계산된 ΔP_{PS} 는 ESS의 상태를 고려하여 산정된 값이 아니기 때문에 실제 ESS가 ΔP_{PS} 만큼의 출력을 더 방전할 수 있는 지 판단이 필요하다. P_{ESS} 와 계산된 ΔP_{PS} 의 차이가 P^{min} 보다 작을 경우 ΔP_{PS} 를 재산정하도록 한다. ESS의 출력 한계를 반영한 ESS의 지령값은 아래 식 (6)과 같이 산정한다. 또는, 배터리의 SOC 상태를 반영하여 피크 절감을 위해 허용된 SOC가 허용범위경계값, SOC_{low} 에 도달하게 되면 ΔP_{PS} 를 재산정하도록 한다. SOC의 상태를 반영한 ESS의 지령값은 아래 식 (7)과 같이 산정한다.

$$\Delta P_{aval} = \frac{(SOC_{min} - SOC) \times C_{ESS}}{24/T} \quad (6)$$

,if $P^{min} \geq P_{ESS} - \Delta P_{PS}$

$$\Delta P_{aval} = (P_{ESS} - \Delta P_{PS}) \frac{SOC}{SOC_{low}} \quad (7)$$

,if $SOC_{low} \geq SOC$

위 식에서 ΔP_{aval} 은 재산정된 ESS의 추가 유효전력 지령값을 의미하며, SOC_{low} 는 Peak shaving 제어에서 ESS의 안정적인 운전을 위해 허용한 최저 허용 범위의 경계값이다.

결론적으로, ESS의 상태 판단에 따라 ΔP_{PS} 를 추

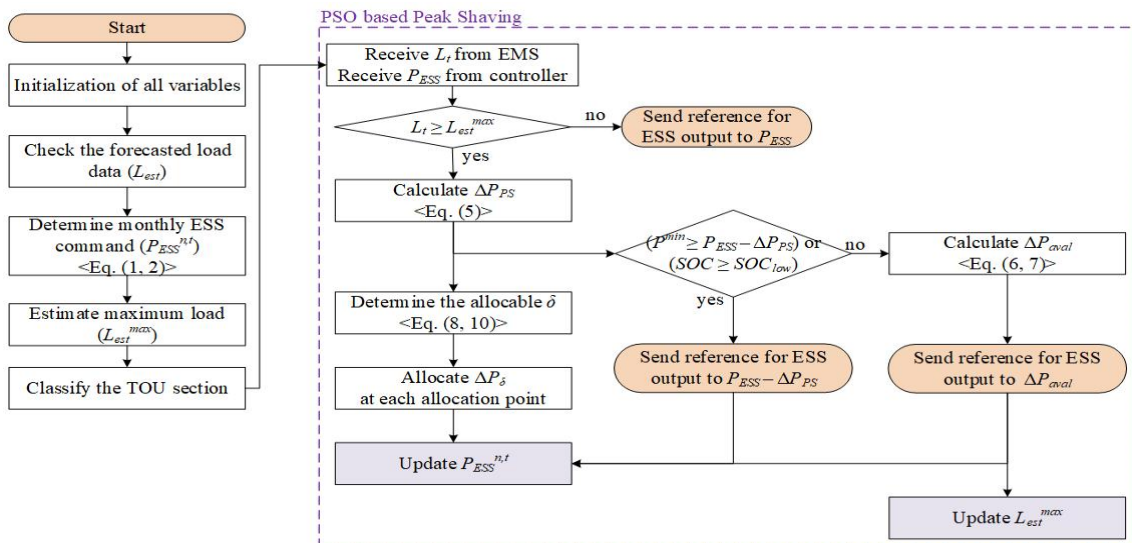


Fig. 3. Flowchart for proposed peak shaving algorithm.
그림 3. 제안한 Peak shaving 알고리즘의 순서도

가적으로 방전해도 되는 경우 ESS의 출력 지령은 $P_{ESS} - \Delta P_{PS}$ 가 되며, 반면에 ESS 출력한계 및 SOC의 허용범위경계값에 도달하면 ESS의 출력 지령은 ΔP_{ava} 이 되어 ESS가 Peak shaving을 수행함에 있어 안정적인 운전이 지속되도록 한다.

2. 추가 유효전력 보상을 위한 최적 할당 방법

ΔP_{PS} 만큼의 유효전력을 ESS가 추가적으로 방전하게 되면 피크부하가 발생한 현재 시점 뒤에 발생할 수 있는 피크 부하 감소에 대비할 수 있는 ESS의 가용용량이 감소하게 된다. 이를 대비하기 위해 ΔP_{PS} 만큼의 크기를 피크 발생 확률이 낮은 다른 시점으로 할당해주어야 한다. 그러나 잘못된 할당은 ESS의 출력을 크게 감소시켜 다시 피크 부하를 발생시킬 수 있다. 제안한 방식은 ΔP_{PS} 의 보상을 위한 할당값이 피크 부하에 영향을 주지 않도록 식 (8)의 목적함수를 사용한다.

$$\min \left(\sum_{\delta=1}^{\delta_{\max}} (L_{est}^{\delta} + P_{ESS}^{\delta} + \Delta P_{allo}^{\delta} + x^{\delta}) / \delta_{\max} \right) \quad (8)$$

위 수식에서 δ , δ_{\max} , x 는 각각 ESS의 유효전력 할당 지점, 최대 할당 개수, 할당값을 의미한다. 즉, 식 (8)은 ΔP_{PS} 의 할당값이 δ_{\max} 개로 할당되며 δ 부터 δ_{\max} 지점까지의 부하 평균이 최소가 되도록 하는 목적함수를 의미한다. 따라서, 피크감소를 위해 ESS가 추가로 ΔP_{PS} 의 방전을 수행한 다음 δ_{\max} 만큼의 시점동안 ΔP_{PS} 크기의 값이 덜 방전되거나 충전되도록 하며, 이 때 할당에 해당되는 시점의 부하들은 그 평균을 최소가 되게 하여 피크 부하까지 도달하는 확률을 감소시키도록 한다.

PSO는 집단을 토대로 한 Stochastic 최적화 기법 중 하나로 초기 집단을 무작위로 생성해 최적해를 찾아간다[16]. PSO는 개별 입자인 Particle과 군집인 Swarm으로 구성되어 있으며, 각 개별 입자들이 최적해를 찾기 위해 다차원의 공간을 이동하고, 자신과 이웃 입자의 결과값 정보를 이용해 더 최적에 가까운 위치로 이동한다. 이 때, 개별 입자의 속도는 아래 식과 같이 업데이트된다.

$$v_{t+1} = Wv_t + c_1r_1(p_{best} - x_t) + c_2r_2(g_{best} - x_t) + \dots \quad (9)$$

위 수식에서 v_t , x_t , g_{best} , p_{best} , W , $c_{1,2}$, $r_{1,2}$ 는 각각 t 시간에서 입자의 속도, t 시간에서 입자의 위치, 전체 최적해, 개별 입자의 최적해, 관성 하중, 가속

상수, 0과 1 사이의 난수를 의미한다.

식 (8)의 목적함수의 해를 PSO를 통해 산정할 때 해의 총 합은 할당되어야 할 ΔP_{PS} 의 크기보다 작을 수 없다는 제약조건이 필요하다. 개별 할당치의 총 합이 ΔP_{PS} 의 크기보다 작을 때에는 패널티를 부여하여 목적함수의 최적 해가 되지 않도록 조치한다.

결론적으로 PSO를 통하여 목적함수의 해를 산정하고 산정된 값은 각 지점의 P_{ESS} 에 추가적인 유효전력 지령값으로 업데이트 된다. 이를 통해 피크 절감을 위한 사용된 ΔP_{PS} 만큼 ESS는 다시 보상을 받아 전기요금 절감 총·방전 제어를 안정적으로 수행할 수 있다.

IV. 사례 연구

제안한 방식의 성능 검증을 위해 실제 부하 데이터와 부하 예측 알고리즘을 반영하여 사례 연구를 수행하였다. 제안한 방식의 알고리즘은 MATLAB 2020a 버전의 소프트웨어를 이용하여 구현 및 검증하였다. 표 3은 사용한 실부하 데이터의 정보를 나타내며, 표 4는 시뮬레이션 수행을 위한 초기 세팅 정보를 나타낸다.

전기요금 절감을 위한 최적 총·방전 제어 알고리즘은 SOC가 10%에서 90% 이내로 운전 되도록 제약조건을 세팅하였다. 제안한 방식에서 SOC 상태를 반영하기 위한 SOC_{low} 는 20%로 세팅하였다. PSO의 초기값으로는 관성 하중을 0.9에서 0.4 사이에 값을 유지하도록 하고, 가속 상수는 2로 세팅하였다. 본 사례 연구에서 사용한 데이터는 15분 주기의 부하 데이터로 하루 단위의 부하는 총 96개의 데이터로 구성된다.

제안한 Peak shaving 알고리즘의 성능 검증을 위한 사례 연구는 두 가지 Case로 비교 검증한다. Case 1은 부하 예측 오차가 낮은 경우에 제안한 Peak shaving의 성능을 확인하며, Case 2에서는 부하 예측 오차가 매우 크게 나타나는 경우에 제안한 Peak shaving의 피크 부하 감소 성능을 확인한다. 마지막으로, 실부하 데이터 기반의 월별 Peak shaving의 성능을 피크 감소와 전기요금 절감의 결과로 검증한다. 그림 4는 Case 1과 2에 각각 적용된 부하 및 부하 예측 프로필을 보여준다.

Table 3. Load characteristics, tariff, and ESS information.

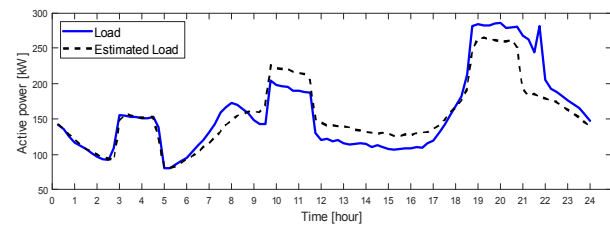
표 3. 실부하 특성과 요금 및 ESS 용량 정보

Tariff type	Peak load [kW]	Households	Battery[kWh] /PCS[kVA]
General tariff (A) II	504.7	2010	250/100

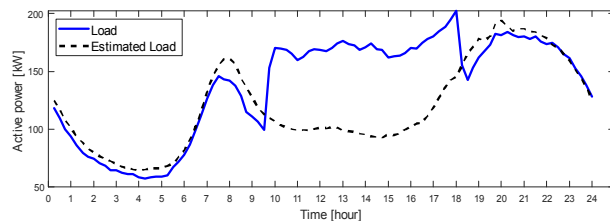
Table 4. Initial setting information for case studies.

표 4. 사례 연구 수행을 위한 초기 세팅 정보

Algorithm settings	P_{ESS}^{min}	-100	P_{ESS}^{max}	100
	SOC^{init}	0.1	SOC^{low}	0.2
	SOC^{max}	0.9	SOC^{min}	0.1
	g^{max}	6		
PSO settings	High inertia weight	0.9	C_1	2
	Low inertia weight	0.4	C_2	2
	maximum iteration	1000	maximum run	50
	tolerance	10e-12		



(a) Case 1



(b) Case 2

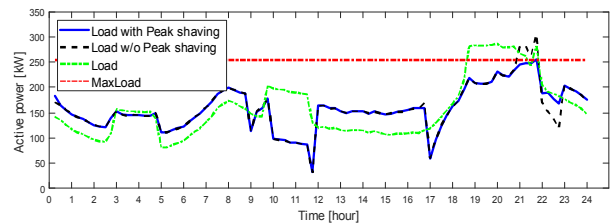
Fig. 4. Load and estimated load for each case.

그림 4. Case 별 부하 데이터 및 부하예측 프로파일

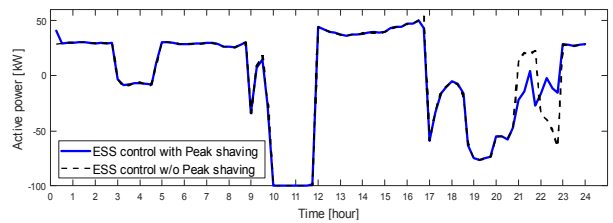
1. Case 1: 부하 예측오차가 작은 경우

그림 5는 부하 예측 오차가 작은 경우 ESS가 전기요금 절감제어만 수행한 경우와 제안한 Peak shaving 제어를 함께 수행한 경우의 결과를 나타낸다. 그림 5a는 ESS가 전기요금 절감 제어만 수행한 경우 반영된 Load와 제안한 Peak shaving 제어가 함께 수행된 경우가 반영된 Load를 비교한다. 부하의 예측 오차가 작고, time index 80 구간까지

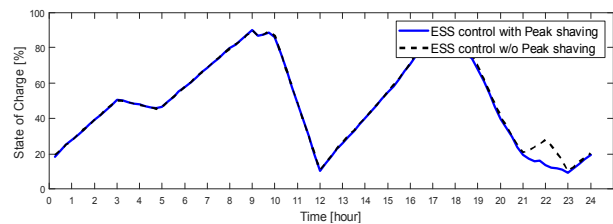
부하가 피크 부하와 차이가 나기 때문에 제안한 Peak shaving 제어는 수행되지 않는다. 하루가 끝나는 21시에서 22시 사이에 부하 예측과 다르게 실제 부하는 예상된 피크값을 넘어 282.1 kW 까지 증가한다. 피크가 발생한 시점에서 전기요금 절감 제어만을 수행하는 경우 예측 부하는 작은 값을 보이며 TOU 요금제 시간대 역시 중간부하 시간대이므로 ESS를 충전하는 제어 지령을 내려 오히려 실제 부하의 피크를 더 높이는 역할을 한다. 반면에, 그림 5b와 c에서 볼 수 있듯이 제안한 Peak shaving이 같이 수행되는 경우 SOC가 18% 정도로 온전히 피크 절감을 위한 출력을 최대로 방전할 수 없었으나, ΔP_{aval} 이 14.85 kW로 적용되어 피크부하의 증가를 억제시킨다. ΔP_{aval} 적용 이후 제안한 방식은 최대부하 시간대에 할당된 값들에 의해 ESS의 방



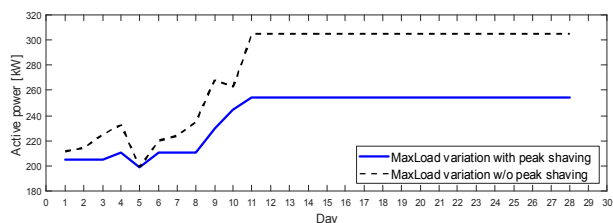
(a) Loads and maximum load



(b) Active powers of ESS



(c) SOC of ESS



(d) Maximum load variations

Fig. 5. Results for Case 1 (Winter data / Feb. 2019).

그림 5. Case 1의 결과(2019년 겨울[2월] 데이터)

전을 작게 하여 SOC를 유지한다. 그림 5d에서는 ESS가 전기요금 절감 제어만 수행한 경우와 제안한 Peak shaving 제어를 함께 수행한 경우의 피크 부하 변화를 확인할 수 있다. ESS가 전기요금 절감 제어만 수행한 경우 부하 예측 오차에 따라 피크가 예상치 못한 지점에서 발생할 경우 피크절감이 이루어지지 않아 오히려 실제 피크부하보다 약 5.47 kW가 증가된 결과를 보였다. Peak shaving 제어를 수행하는 경우 ESS가 허용할 수 있는 범위 내에서 피크절감을 지속적으로 수행하기 때문에 제어가 적용되지 않는 경우와 달리 피크부하의 증가가 크지 않고 254.52 kW로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

2. Case 2: 부하 예측오차가 큰 경우

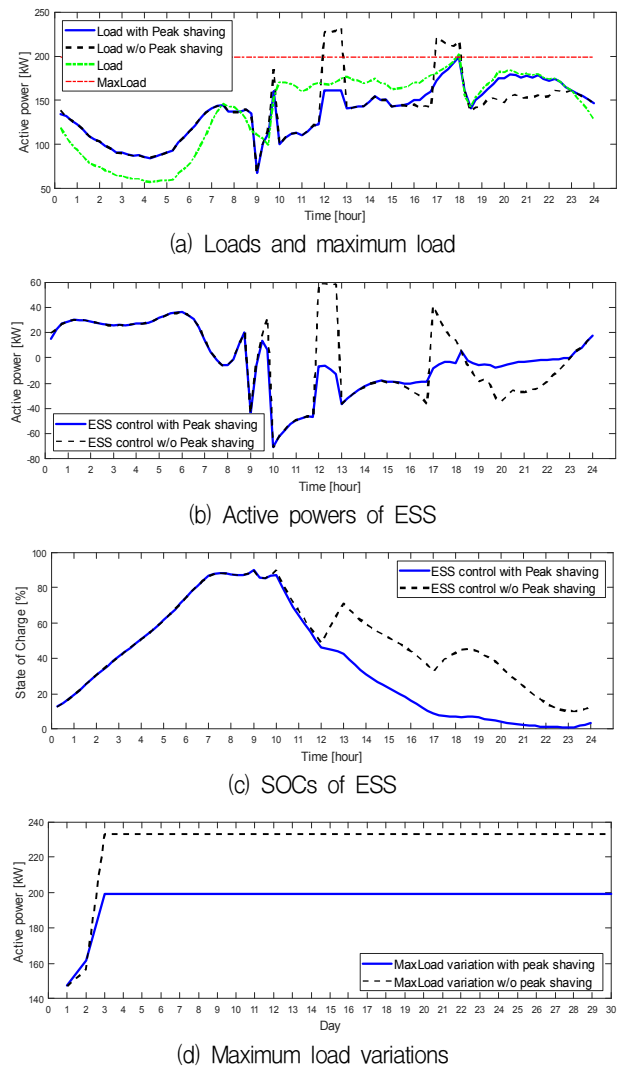


Fig. 6. Results for Case 2 (Summer data / Jun 2019).
그림 6. Case 2의 결과(2019년 여름[6월] 데이터)

그림 6은 부하 예측 오차가 큰 경우 ESS가 전기요금 절감제어만 수행한 경우와 제안한 Peak shaving 제어를 함께 수행한 경우의 결과를 나타낸다. 그림 7a는 ESS가 전기요금 절감 제어만 수행한 경우 반영된 Load와 제안한 Peak shaving 제어가 함께 수행된 경우가 반영된 Load를 비교한다. 본 Case에서는 예측 오차가 큰 경우를 모사하여 제안한 방식의 성능을 검증하기 위해 그림 4b와 같은 부하를 적용한 경우의 결과를 설명한다.

그림 6a는 ESS가 전기요금 절감 제어만 수행한 경우 반영된 Load와 제안한 Peak shaving 제어가 함께 수행된 경우가 반영된 Load를 비교한다. 부하의 예측 오차가 크고 특히 10시부터 실제 부하는 피크와 가까운 부하소비가 이루어지는 반면에 예측부하에서는 100 kW 정도의 부하소비를 예측하였다. 이에 따라, 예측 부하에 기반한 전기요금 절감 알고리즘만을 수행한 경우는 시세 차익 거래를 통한 요금절감을 위해 중간부하 시간대인 12시부터 13시 사이에는 ESS의 정격에 가까운 전력량을 충전하는 제어를 수행하였다. 반면 제안한 Peak shaving 제어를 함께 수행한 경우, 부하 오차가 큰 12시부터 ESS가 충전하는 지령을 억제시키고, ΔP_{PS} 를 계산해 오히려 ESS가 방전하는 제어 지령을 내도록 하였다. 이에 따라 효과적으로 피크를 절감하여 기존 방식만 사용한 경우와 비교하였을 때, 약 34.08 kW의 피크를 절감하였다.

그림 6b와 c는 각각 ESS의 유효전력 출력과 SOC를 보여준다. 전기요금 절감만 수행한 경우 시세 차익 거래를 위해 ESS는 12시부터 13시까지 출력을 급격히 증가시켜 충전을 수행한다. 이에 따라 SOC가 약 22.23% 증가하였고, 이후 최대부하 시간대에 방전하여 SOC가 36.70%까지 감소하였다. 반면, 제안한 Peak shaving 제어가 같이 수행된 경우 12시부터 1시까지 피크를 감소시키기 위하여 ESS의 충전을 방지하고 방전을 수행하였으며 이에 따라, SOC가 지속적으로 감소하는 결과를 보인다. 약 18시경에 실제부하는 다시 피크부하에 도달하는데 이때 제안한 방식은 ESS의 SOC가 매우 낮음에 따라 ΔP_{aval} 을 계산하였으며, 약 18.08 kW를 방전하여 피크 부하 감소를 수행하였다.

그림 6d는 ESS가 전기요금 절감 제어만 수행한 경우와 제안한 Peak shaving 제어를 함께 수행한 경우의 피크 부하 변화를 나타낸다. 부하 예측 오

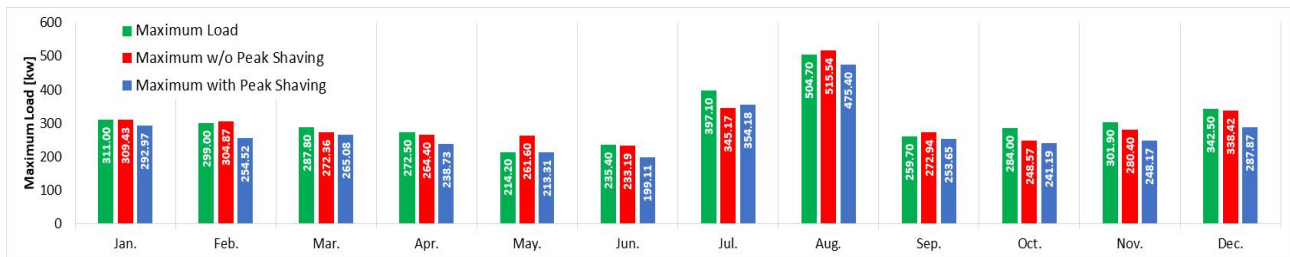


Fig. 7. Results for annual maximum load.

그림 7. 연간 최대 부하 결과

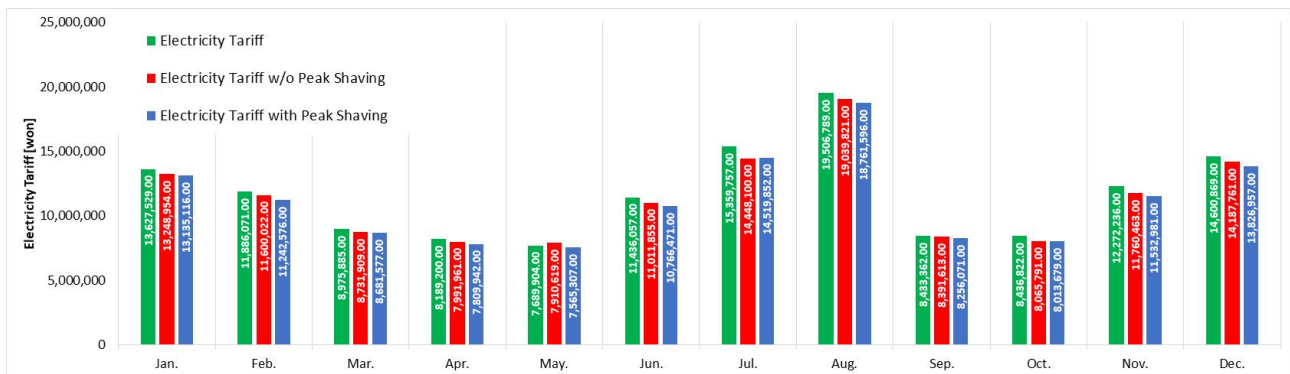


Fig. 8. Results for annual electricity tariff.

그림 8. 연간 전기 요금

차가 큰 6월 3일에서 피크 부하를 ESS 상태를 고려한 피크 부하 감소가 수행되어 성공적으로 피크 부하를 199.11 kW까지 감소시켰다. 이후 6월 달에는 부하 예측 오차가 작은 범위에서 부하 예측이 이루어져 피크 부하를 넘는 날이 없었다. 이를 통해, 한 달의 부하 예측 중 하루만 예측오차가 큰 날이 존재해도 결과와 같이 적용되는 피크 부하 결과는 크게 차이가 날 수 있음을 확인한다.

그림 7은 1년간 전기요금 절감을 위한 ESS의 충·방전 제어를 적용한 경우와 제안한 Peak shaving을 같이 적용한 경우의 최대부하 결과를 나타낸다. 부하 예측이 큰 여름철과 겨울철에서는 제안한 Peak shaving 제어가 함께 적용될 때 최대 17.8%의 피크 부하 감소에 대한 결과를 보였다. 특히 2월, 5월, 8월, 9월은 전기요금 절감을 위한 제어를 수행한 경우 ESS를 사용하지 않은 경우의 실제 부하보다 높은 피크 부하 결과를 보였다. 이는 부하예측 오차가 크고 실제 부하의 피크 발생 시점이 중간부하 시간대에 나타나 ESS가 충전을 하는 문제에 의해 발생한 결과이다. 이를 볼 때, 전기요금 절감을 위한 ESS는 제안한 방식 등의 Peak shaving을 동시에 제어하여 함께 수행해 피크가 더 증가하는 문제를 방지해야 한다.

한 달 단위로 피크에 따라 계약전력을 바꿀 수 있다고 가정했을 때, 계산한 전기요금 절감 효과를 그림 8에서 보여준다. 제안한 Peak shaving을 동시에 수행하였을 때 전기 요금은 유지되거나 피크 감소 효과로 전기 요금 절감 효과가 더 증가할 수 있다. 12월에는 최대 6.02%의 절감 효과를 보였다.

IV. 결론

본 논문은 전기요금 절감용 ESS를 활용한 PSO 기반 Peak shaving 제어 방법을 제안하였다. 제안한 방식은 ESS의 충·방전 제어 수행 중에 ESS의 운전범위 및 SOC를 안전 범위 내에서 운전하면서 실제 부하의 피크를 감소시키는 것을 목적으로 하였다. 이를 달성하기 위해 제안한 알고리즘은 실제 부하와 예상되는 부하의 소비를 비교하여 피크 절감을 위해 ESS가 추가로 방전해야 하는 추가 유효전력값을 계산하여 입력을 더하였다. 또한 추가로 증가시킨 유효전력을 보상하기 위해, 유효전력을 결정한 지점까지 할당하는 과정을 수행하며 이때 유효전력 할당치가 피크 부하에 영향을 주지 않도록 할당되는 지점의 예상되는 부하 평균이 최소가 되도록 하는 최적해를 PSO를 통해 산정하였다.

제안한 방식의 성능 검증을 위해 실제 부하 데이터와 부하 예측 알고리즘을 반영하여 부하 예측 오차가 적은 경우와 예측 오차가 큰 경우의 사례 연구를 수행하였다. 또한, 1년간 월별 피크 절감 효과와 전기요금절감 효과 등을 확인하여 제안한 방식의 성능을 검증하였다. 사례 연구 수행 결과 제안한 방식을 전기요금 절감을 위한 ESS 충·방전 제어 방식과 같이 수행한 경우 부하 예측 오차가 큰 경우에도 성공적으로 피크부하 절감을 수행하였으며, 최대 17.8%의 피크 부하 절감 효과와 6.02%의 전기요금 절감 효과를 보였다.

References

- [1] "Statistics of electric power in KOREA," Korea Electric Power Corporation, 2019.
- [2] A. Oudalov, R. Cherkaoui, and A. Beguin, "Sizing and optimal operation of battery energy storage system for peak shaving application," *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, pp.621-625, 2007.
- [3] Jong-young Park, Jae-Haeng Heo, Seungkwon Shin, Hyungchul Kim, "Economic Evaluation of ESS in Urban Railway Substation for Peak Load Shaving Based on Net Present Value." *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol.12, no.2, pp.981-987, 2017. DOI: 10.5370/JEET.2017.12.2.981
- [4] S. U. Agamah, and L. Ekonomou, "Peak demand shaving and load-levelling using a combination of bin packing and subset sum algorithms for electrical energy storage system scheduling," *IET Science, Measurement & Technology*, vol.10, no.5, pp.477-484, 2016. DOI: 10.1049/iet-smt.2015.0218
- [5] R. Barzin, J. J. J. Chen, B. R. Young, and M. M. Farid, "Peak load shifting with energy storage and price-based control system," *Energy*, vol.92, no.1, pp.505-514, 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2015.05.144
- [6] L. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications," *Renew. and Sustain. Energy Reviews*, vol.13, no. 6-7, pp.1513-1522, 2009. DOI: 10.1016/j.rser.2008.09.028
- [7] H. Pandžić, "Optimal battery storage investment in buildings," *Energy and Buildings*, vol.175, no.1, pp.189-198, 2018. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.032
- [8] W. A. Qureshi, N.-K. C. Nair, and M. M. Farid, "Impact of energy storage in buildings on electricity demand side management," *Energy Conversion and Management*, vol.52, no.5, pp. 2110-2120, 2011. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.032
- [9] Jae-Haeng Heo, Seungkwon Shin, Jong-young Park, and Hyeongig Kim, "Study on the optimal operation of ESS considering urban railway load characteristic," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.64, no.10, pp.1508-1516, 2015. DOI: 10.5370/KIEE.2018.67.11.1536
- [10] Eun-Kyoung Gong, Jin-Man Sohn, "A study on ESS optimal operation strategy using two stage hybrid optimization," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.67, no.7, pp.833-839, 2018.
- [11] Y. Diab, R. Auger, E. Schaeffer, and M. Wahbeh, "Estimating lithium-ion battery state of charge and parameters using a continuous-discrete extended Kalman filter," *Energies*, vol.10, no.8, pp.1-19, 2017. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.09.010
- [12] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, and R. Jackey, "High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells," in *Proc. 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, pp.1-8, 2012. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183271
- [13] J. P. Vielma, "Mixed integer linear programming formulation techniques," *SIAM Review*, vol.57, no.1, pp. 3-57, 2015. DOI: 10.1137/130915303
- [14] Chae-Rin Kim, Chi-Yeon Kim, Dong-Keun Kim, Hyoung-Jin Choi, Si-Sam Park, Soo-Hwan Cho, "A study on the prediction method of community power demand in summer and winter with the sensitivity of temperature," in *Proc. 2019 Summer conference of the Korean Institute of Electrical Engineers*, pp.684-685, 2019.

[15] Kyung-Bin Song, "A study on short-term load forecasting technique and its application," *Korea power exchange; Technical report*, 2011.

[16] Yamille del Valle, "Particle swarm optimization: Basic concepts, variants and applications in power systems," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol.12, no. , pp.171-195, 2008.

DOI: 10.1109/TEVC.2007.896686

BIOGRAPHY

Myoung-Woo Park (Member)



2014~Current : Undergraduate in Computer Engineering, Korea University of Technology and Education

Moses Kang (Member)



2015 : B.S degree in Electrical Engineering, Jeonbuk National University.
2017 : M.S degree in Electrical Engineering, Jeonbuk National University.
2018~Current : Researcher, Korea Institute of Energy Research (KIER)

Yongwoon Yoon (Member)



2015~Current : Undergraduate in Information & Communication Engineering, Korea University of Technology and Education

Kuk-Yeol Bea (Member)



2017 : Ph. D. degree in Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
2017~Current : Senior Researcher, Korea Institute of Energy Research (KIER)

Seonri Hong (Member)



2013 : B.S degree in Computer Engineering, Hanbat National University.
2021 : M.S degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

Jong-Bok Beak (Member)



2007 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungpook National University.
2014 : Ph.D degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
2014~2015 : Senior Researcher, Samsung Electronics.
2015~current : Principal Researcher, Korea Institute of Energy Research.