

# 신재생 에너지가 도입된 전력저장장치의 첨두부하절감 효과를 고려한 최적 구성 알고리즘

## Optimal Configuration Algorithm for ESS with Renewable Energy Resources Considering Peak-shaving Effects

이 나 은\* · 김 옥 원\* · 김 진 오†  
(Na-Eun Lee · Wook-Won Kim · Jin-O Kim)

**Abstract** - A power system configuration has been increasingly advanced with a number of generating units. In particular, renewable energy resources are widely introduced due to the environmental issues. When applying the renewable energy sources with the ESS (Energy Storage System), the ESS is the role of a potential generating resource in the power system while mitigating the output volatility of renewable energy resources. Thus, for applications of the ESS, the surrounding environment of it should be considered, which means that capacity and energy of the ESS can be affected. Moreover, operation strategy of the ESS should be proposed according to the installation purpose as well as the surrounding environment. In the paper, operation strategy of the ESS is proposed considering load demand and the output of renewable energy resources on a hourly basis. Then, the cost of electrical energy is minimized based on the economic model that consists of capital cost, operation cost, fuel cost, and grid cost for a year. It is sure that peak-shaving effects can be achieved while satisfying the minimum cost of electrical energy.

**Key Words** : Energy storage system (ESS), Peak-shaving, Operation strategy, Renewable energy resources, Optimal configuration

### 1. 서 론

전기 에너지는 매순간 수요와 공급이 일치되어야 하므로 항상 최대 부하보다 어느 정도 여유를 갖는 공급능력을 갖추어야 한다. 이처럼 발전설비용량을 만족하는 안정적인 계통 운영을 위해서 장기적인 수요 예측을 통한 운영 계획을 수립하거나 발전설비를 계획해야 한다. 최근 발전설비의 종류는 다양해지고 있고, 그 중에서도 화석연료로 인한 지구 온난화와 환경오염 문제로 인해 신재생 에너지원의 도입이 점차 증가하고 있다. 하지만 신재생 에너지의 발전량은 자연 환경에 영향을 받기 때문에 전력 공급량을 예측하고 운영 계획을 수립하는데 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 전력 저장장치(ESS)를 연계함으로써 신재생 에너지원의 불규칙적인 발전을 보완하고 계통의 부하 평준화(Load-levelling) 또는 첨두부하절감(Peak-shaving)와 같은 효과를 얻을 수 있다[1]-[3]. ESS의 도입은 반복적인 충·방전 기능을 통해 잠재적인 발전원으로써 수행이 가능하며, 이는 전력 시스템의 중·장기적 운영 계획 수립에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 기존 화력, 수력, 신재생 에너지 등과 같은 발전 설비에 도입되는 ESS는 각각의 발전설비의 서로 다른 특성을 고려하여 적용되고, 이것은 ESS의 출력과 용량 구성에도 영향을 준

다. 따라서 계통에 ESS를 도입하기 위해서는 설치 목적과 주변 설비를 고려하여 구성할 필요가 있다[4].

본 논문에서는 계통에 신재생 에너지와 ESS를 도입하기 위한 최적 구성 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘에서는 시간대별 부하 수요와 신재생 에너지의 매순간 불확실한 출력 특성을 반영한 ESS의 시간대별 SOC(State Of Charge)가 산정된다. 이 때 산정된 SOC는 해당 시간의 충·방전 모드를 결정짓는다. 이를 바탕으로 각각의 발전 설비의 경제성을 평가하고, 최종적으로 최소 전기 에너지 비용을 갖도록 적정 계통이 구성된다. 경제성을 평가하기 위해 시스템을 구성하고 있는 발전 설비의 총 비용이 목적함수로 많이 사용되고, 이는 각 발전 설비의 자본비용, 운용비용, 연료비용, 그리고 계통비용으로 구성할 수 있다. 따라서 제안한 알고리즘을 바탕으로 신재생 에너지와 ESS가 도입된 계통의 경제성 모델을 만족하면서 즉, 전기 에너지 비용의 최소화를 이루면서 신재생 에너지원과 ESS의 최적 용량을 산정할 수 있다.

### 2. 신재생 에너지 및 ESS 모델링

태양광 발전, 풍력 발전에 도입되는 ESS의 최적 구성 알고리즘을 제안하기 위해서 시간대별로 부하 수요, 신재생 에너지의 출력, 그리고 ESS의 모델링이 이루어져야 한다. 태양광 및 풍력 발전 모델링은 기상 데이터를 기반으로 정의한다[5]-[6].

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

Received : March 27, 2014; Accepted : August 04, 2014

### 2.1 태양광 발전 출력 모델링

태양광 발전의 출력은 모듈의 면적, 일사량, 셀의 온도 등으로 결정되고, 이는 식 (1)과 같다.

$$P_{pv} = \eta_{pv} N_{pv} A_m G_t [1 - \lambda(T_c - 25)] \quad (1)$$

여기서,  $\eta_{pv}$ 는 태양광 패널의 효율(%),  $N_{pv}$ 는 모듈 개수,  $A_m$ 는 단일 태양광 패널의 면적( $m^2$ ),  $G_t$ 는 일사량,  $\lambda$ 는 최대 전력 온도 계수 ( $-0.47\%/^{\circ}C$ ),  $T_c$ 은 셀 온도이다. 식 (1)은 셀의 온도를 반영한 태양광 발전의 출력식이며, 셀 온도는 식 (2)와 같이 주위 온도에 따라 결정된다.

$$T_c = T_a + \left( \frac{NT - 20}{K_c} \right) \cdot S \quad (2)$$

여기서,  $T_a$ 는 주위 온도( $^{\circ}C$ ),  $NT$ 는 시스템 설계자들에 의해 지정되는 셀 온도( $^{\circ}C$ ),  $S$ 는 태양광 일사량( $kW/m^2$ )이다.

### 2.1 풍력 발전 출력 모델링

풍속에 따른 풍력발전의 출력식은 일반적으로 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\begin{cases} P_w = 0 & v(t) < V_{ci} \text{ or } v(t) > V_{co} \\ P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot v(t)^3 & V_{ci} < v(t) < V_{co} \\ P_w = P_r & V_r < v(t) < V_{co} \end{cases} \quad (3)$$

여기서,  $V_{ci}$ ,  $V_r$ ,  $V_{co}$ 는 각각 시동, 정격, 종단 속도이다. 시동 풍속과 정격 풍속 사이의 출력식에서는  $\rho$ 는 공기 밀도( $kg/m^3$ ),  $A$ 는 로터 면적( $m^2$ ),  $C_p$ 는 풍력 터빈의 효율,  $v(t)$ 는 해당 시간의 풍속( $m/s$ )을 의미한다.

### 2.3 ESS 모델링

부하나 신재생 에너지의 변동성을 효율적으로 관리하기 위한 대안으로 ESS를 도입할 수 있다. 특히, 신재생 에너지가 도입된 계통에서는 ESS를 통해 갑작스러운 변동성에도 짧은 시간내에 안전하게 대응할 수 있다. ESS의 목적에 따라 크게 출력과 용량의 구성이 달라진다. 예를 들면, 태양광 발전의 경우에는 출력이 일사량에 많은 영향을 받기 때문에 낮에 생산된 전기를 밤에 사용하기 위해서 에너지 저장장치의 용량이 클수록 좋기 때문에 용량을 크게 구성할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 신재생 에너지에 ESS를 도입하기 위해서 시간대별로 부하와 신재생 에너지의 출력을 고려한 SOC가 산정된다. 이 때의 SOC에 의해 해당 시간의 충·방전할 전력 공급량을 결정짓는다. ESS의 충전 전력량은 식 (4)와 같이 나타낸다[7]-[8].

$$P_s(t+1) = P_s(t) \cdot (1 - \sigma) + [\min[P_{res}(t) - P_{load}(t), P_{soc}^{max} - P_s(t), P_{charge}^{max}] \cdot \eta_s \quad (4)$$

여기서,  $\sigma$ 은 ESS 자가방전율,  $P_{load}$ 은 부하,  $P_{res}$ 은 태양광 및 풍력 터빈의 총 출력,  $P_{soc}^{max}$ 은 SOCmax,  $P_{charge}^{max}$ 은 충전 가능한 최대용량,  $\eta_s$ 은 ESS 효율을 의미한다. 신재생 에너지의 전체 출력식은 풍력 및 태양광 발전의 총 출력이며, 식 (5)과 같다.

$$P_{res}(t) = P_{pv}(t) \cdot \eta_{inv} + P_w(t) \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{conv} \quad (5)$$

여기서,  $\eta_{inv}$ 는 인버터 효율,  $\eta_{conv}$ 는 컨버터 효율을 의미한다. ESS의 방전할 전력량은 식 (6)과 같다.

$$P_s(t+1) = P_s(t) \cdot (1 - \sigma) - [\min[P_{load}(t) - P_{res}(t), P_s(t) - P_{soc}^{min}, P_{discharge}^{max}] \cdot \eta_s \quad (6)$$

여기서,  $P_{soc}^{min}$ 은 SOCmin,  $P_{discharge}^{max}$ 은 방전 가능한 최대용량을 의미한다.

## 3. 최적 구성 알고리즘

### 3.1 ESS 운영 모드

ESS는 설치 목적과 주변 설비에 따라 서로 다른 운용 특성을 갖고 수행된다. 일반적으로 신재생 에너지에 도입된 ESS의 경우에는 신재생 에너지원의 매순간마다 변하는 출력 특성이 충·방전 전력 공급량에 영향을 준다. 또한, 부하 수요는 크게 경부하, 중부하, 그리고 최대부하에 따라 ESS의 전력 충·방전량을 고려한다면 신재생 에너지의 전력 공급량의 효율성을 높일 수 있다. ESS의 운영 모드는 크게 ESS 단독 운영모드, ESS+디젤 발전기 운영모드, 그리고 디젤 발전기 운영 모드로 분류할 수 있으며, 각 모드별 운전 특성은 그림 1과 같이 도식화한다. 여기서, 디젤 발전기는 ESS의 백업전원이다. 본 논문에서는 태양광 및 풍력 발전 설비는 부하 추종(Load-following)을 기반으로 부하에 공급되고, 이후에 여분의 신재생 에너지가 발생한다면 ESS에 충전되어 필요시에 이용 가능하다. 하지만 신재생 에너지가 부하를 충족하지 못하고 부족한 경우에는 ESS를 통해 부족한 전력량을 보충할 수 있다. 여기서,  $P_{sp}(t)$ 는 ( $t$ )시간에서의 부하에 공급해야 할 전력량을 의미하고, 식 (7)과 같다.

$$P_{sp}(t) = P_{load}(t) - P_{res}(t) \quad (7)$$

#### 1) ESS 단독 운영 모드

신재생 에너지의 총 출력이 부하를 충족할 수 없는 경우 ESS의 SOC에 따라 부하를 충분히 충족이 가능하다면 단독으로 전력을 공급할 수 있다. 경부하시 단독 운영모드에서는 SOC( $t+1$ )를 추정하여 50%이상이면 부하에 충전된 전력을 방전한다. 중부하 또는 최대부하시 SOC( $t$ )가 50%이상이면 방전하고, 40~50% 수준에 머무르면 ( $t+1$ )시간에서의 SOC상태를 추정하여 방전을 결정한다. 이 때 방전 가능한 SOC값 SOC( $t+1$ )은 SOCmin을 만족해야 한다.

#### 2) ESS+디젤 발전기 운영 모드

수요가 급증하거나 신재생 에너지의 총 출력량이 부하를

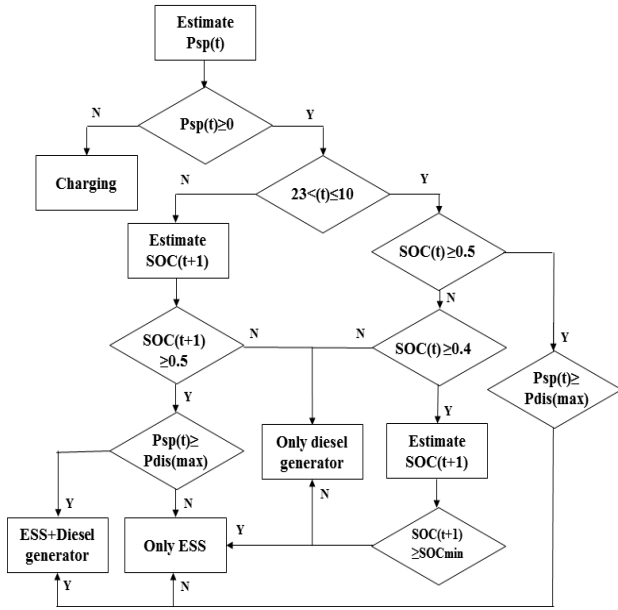


그림 1 ESS 운영 모드  
Fig. 1 Operation strategy of the ESS

충분히 충족하지 못할 경우에는 ESS 단독 운전을 통해 필요한 전력량을 충족하지 못한다. 경부하시에는 단독 운영모드와 마찬가지로 SOC(t+1)을 추정하여 50%이하일 경우 ESS의 최대 방전 가능한 용량보다 충족해야 할 부하량이 많을 경우는 디젤 발전기와 함께 공급된다. 중부하 또는 최대부하시 SOC(t)가 50%이상으로 충분히 방전 가능한 상태이지만 부하가 ESS의 최대 방전 가능한 용량보다 많을 경우 디젤 발전기와 함께 공급토록 한다.

3) 디젤 발전기 운영 모드

ESS의 기술적 제약조건을 만족하지 못할 경우이다. 부하에 공급해야 할 전력량이 ESS의 방전 가능한 적정 SOC를 만족하지 못한다면 디젤 발전기 혹은 계통에서 전력이 공급되어야 한다. 경부하시 (t+1)시간에서의 SOC가 50%미만으로 추정된다면 디젤 발전기로 전력을 공급해야 한다. 그리고 중부하 또는 최대부하시에는 ESS의 (t)시간에서의 SOC가 40%미만일 경우에는 방전이 불가능하기 때문에 디젤 발전기가 가동된다. 또한, ESS의 SOC가 40~50% 수준에 머무르면 (t+1)시간의 SOC상태를 추정하여 SOCmin를 만족하지 못한다면 디젤 발전기만 운영된다. 이 때의 ESS는 충전을 필요로 한다.

3.2 제약조건

신재생 에너지의 불확실한 출력량을 시간대별로 효율적으로 운용하면서 안정적인 수급균형을 만족하기 위해 ESS 운영 모드가 결정되었다. 이 때, 각 발전 설비의 제약조건을 만족해야 하며, 이는 식 (8)~(12)과 같다.

$$P_{pv} \leq P_{pv}^{max}, P_w \leq P_w^{max} \tag{8}$$

$$P_{charge}^{min} \leq P_{charge}(t) \leq P_{charge}^{max} \tag{9}$$

$$P_{discharge}^{min} \leq P_{discharge}(t) \leq P_{discharge}^{max} \tag{10}$$

$$P_{res}(t) + P_s(t) + P_{diesel}(t) \geq P_{load}(t) \cdot (1+r) \tag{11}$$

$$\sum_{t=1}^T (P_{charge}(t) - P_{discharge}(t) - P_s) = 0 \tag{12}$$

여기서,  $P_{pv}^{max}$ 는 태양광 발전의 설비용량,  $P_w^{max}$ 는 풍력 발전의 설비용량,  $P_{charge}(t)$ 는 (t)시간에서의 충전량,  $P_{discharge}(t)$ 는 (t)시간에서의 방전량,  $P_{diesel}(t)$ 는 (t)시간에서의 디젤 발전기 출력량을 의미한다.

4. 경제성 평가

신재생 에너지가 도입된 전력 계통에 ESS를 도입하기 위해 경제성 평가가 이루어진다. 이러한 경제성 평가에서는 시스템의 총 비용이 목적함수로 많이 사용되고 이는 자본비용, 운영비용, 그리고 연료비용 등으로 구성된다. 경제성 평가를 기반으로 구성된 계통을 비교함으로써 최적 구성이 이루어진다[8]-[10].

4.1 목적함수

본 논문에서는 계통에서 kWh당 생산하는데 드는 비용을 최소화하는 신재생 에너지와 ESS의 최적 구성이 이루어진다. 목적함수는 식 (13)과 같이 나타낸다.

$$COE = \frac{C_{cp} + C_{op} + C_{fuel} + C_{grid} [\$/]}{P_{total} [kWh]} \tag{13}$$

목적함수에서는 자본비용, 운용 및 유지비용, 연료비용, 그리고 계통 대체 비용에 이르기까지의 총 비용을 단위 발전량으로 나눈 전기 에너지의 비용(COE; Cost Of Electricity) 개념을 적용한다. 이러한 목적함수의 최적화를 수행하고, 발전단가의 최소화를 만족하는 신재생 에너지와 ESS의 구성을 이루도록 한다. 모든 비용은 연간 비용을 기준으로 한다.

4.2 연간 자본비용

초기 자본비용은 자본회수계수(CRF) 개념을 적용하여 전체의 수행 기간에 대한 연간 투자비로 계산하며, 이는 식 (14)와 같다[9].

$$C_{cp} = CRF(r,n) \cdot \sum_{i=1}^I (R_i \cdot K_i) \tag{14}$$

여기서, r은 이자율, n은 프로젝트 기간,  $R_i$ 는 i번째 발전기의 정격용량,  $K_i$ 는 i번째 발전기의 정격용량에 따른 자본비용을 의미한다.

4.3 연간 운영비용

ESS의 백업전원인 디젤 발전기의 운영비용은 0.02[\$/kWh]이고, 이에 도입된 신재생 에너지원의 발전 설비의 경우에는

0.02[cents/kWh]으로 정의한다[8],[10]. ESS의 연간 운영비용은 충.방전이 이루어지는데 드는 비용을 고려하며, 이는 식 (15)과 같다.

$$C_{op} = \sum_{t=1}^T P_{charge}(t) \cdot K_e \quad (15)$$

여기서,  $P_{charge}(t)$ 는 (t)에서의 출력 전력,  $K_e$ 는 에너지 비용을 의미한다.

#### 4.4 연간 연료비용

디젤 발전기와 같이 연료를 소모하는 발전기의 운영에 들어가는 연료비용은 식 (16)과 같이 나타낸다.

$$C_{fuel} = \sum_{t=1}^T P_{diesel}(t) \cdot D_f \cdot K_f \quad (16)$$

여기서,  $P_{diesel}(t)$ 는 (t)시간에서의 디젤 발전기 출력 전력,  $D_f$ 는 연료 소비율,  $K_f$ 는 디젤 발전기의 연료비용을 의미한다.  $P_{diesel}(t)$ 는 ESS의 운영 모드에 따라 전력 출력량이 산정되고, 이는 식 (17)와 같이 나타낸다.

$$\sum_{t=1}^T (P_{diesel}(t) - P_{with}(t) + P_{without}(t)) = 0 \quad (17)$$

여기서,  $P_{with}(t)$ 는 ESS+디젤 발전기 운영 모드시 (t)시간에서의 디젤 발전기 출력량,  $P_{without}(t)$ 는 디젤 발전기 단독 운영 모드시 (t)시간에서의 디젤 발전기 출력량을 의미한다.

#### 4.5 연간 계통비용

계통과 연계시에는 부하가 급증하거나 발전량이 부족할 경우에 계통으로부터 부족한 전력을 공급받을 때 드는 비용을 고려해야 하며, 이는 식 (18)과 같다.

$$C_{grid} = \sum_{t=1}^T P_{grid}(t) \cdot K_g \quad (18)$$

여기서,  $P_{grid}(t)$ 는 (t)시간에서의 부족한 전력량,  $K_g$ 는 부족한 전력을 계통으로부터 공급받을 때 드는 비용을 의미한다.

### 5. 사례 연구

#### 5.1 모의 계통 구성

본 논문에서는 신재생 에너지와 ESS를 고려한 적정 계통을 구성하기 위한 최적 구성 알고리즘을 제안하였다. 먼저, 신재생 에너지의 출력량을 산정하기 위해 기상청 국가기후자료센터에서 제공되는 기상 데이터를 참고하였으며, 이는 그림 2와 같다. 또한, 각 발전 설비의 모델링에 필요한 변수 및 경제성을 평가하기 위한 프로젝트 기간, 이자율 등과 같은 변수들은 표 1과 같이 정의한다[6]-[7],[10].

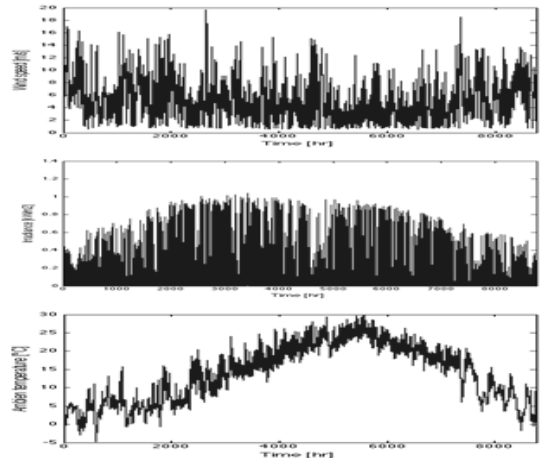


그림 2 연간 풍속, 일사량, 주위온도

Fig. 2 Wind speed, irradiance, and ambient temperature during a year

표 1 모의 계통 변수

Table 1 /Input parameters for the simulated system

명칭	변수	변수
태양광 발전	최대 출력 용량 [W]	250
	효율 [%]	15.51
	면적 [m <sup>2</sup> ]	1.612
풍력 발전	정격 출력 [kW]	1
	Cut-in 속도 [m/s]	3
	정격 속도 [m/s]	11.6
	Cut-out 속도 [m/s]	25
	로터 직경 [m]	2.7
	공기 밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]	1.225
ESS	컨버터 효율 [%]	95
	Round-trip 효율 [%]	93
	SOC Limit [%]	30~95
경제성 모델	이자율 [%]	4
	프로젝트 기간 [yr]	20
	태양광 자본비용 [\$/kW]	2000
	풍력 자본비용 [\$/kW]	1300
	ESS 자본비용 [\$/kW]	300
	ESS 에너지 비용 [\$/kWh]	0.18
	디젤 SFC[liter/kWh]	0.259
	디젤 연료비용 [\$/liter]	1.3

본 모의 실험에서는 태양광 패널의 출력은 단위 면적당 입사되는 에너지량으로 정의되고, 이 패널의 최종 출력은 셀 변환효율 15.51[%]을 따른다. 이 때, 각 패널의 최대 출력 용량은 250[W]으로 정의한다. 풍력발전의 경우 해당 지역의 공기밀도는 1.255 [kg/m<sup>3</sup>]이고 풍속에 따라 출력이 달리 계산되는데 정격출력의 경우에는 풍력 터빈의 직경을 2.7[m]

로 정의한다. 연간 부하 곡선은 계절별, 시간대별 전기수요 패턴을 분석한 보고서를 바탕으로 8760시간의 부하량으로 재구성하였다.

### 5.2 제안한 구성 알고리즘 결과

본 모의 실험에서는 신재생 에너지의 출력과 부하를 고려한 ESS의 충.방전이 수행되었고, 이를 바탕으로 최적 구성이 이루어졌다. ESS의 반복적인 충.방전은 시간대별로 SOC를 산정하게 되는데, 이 때 산정된 SOC에 의해 ESS로부터 충.방전될 전력량이 결정되었다. 그 결과 해당 시간의 SOC에 따라 결정된 풍력 및 태양광 발전의 출력량, ESS의 충.방전량, 그리고 부하를 계절별로 나타내면 그림 3과 같다.

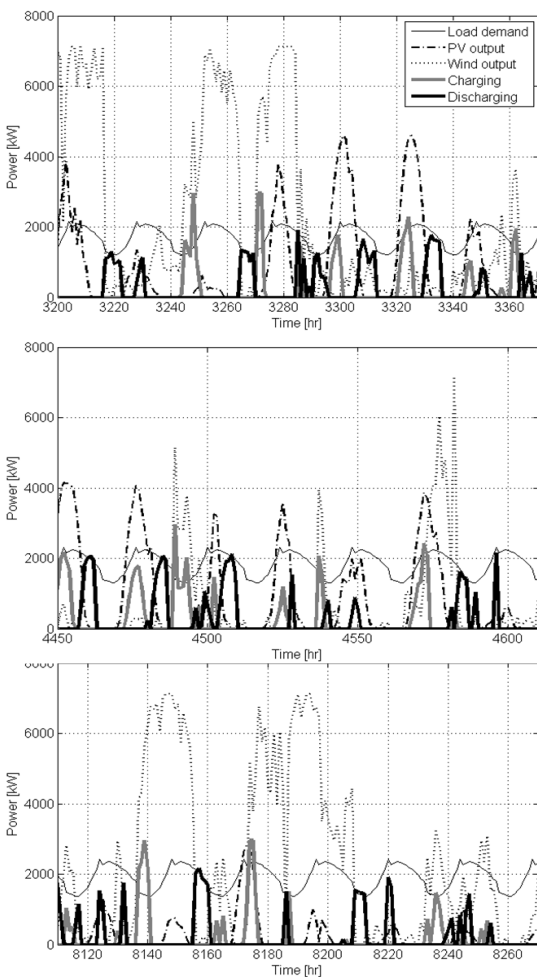


그림 3 주간 부하, 신재생 에너지, ESS 충.방전 전력 출력량 (a) 4월 (b) 7월 (c) 12월

Fig. 3 Load demand, renewables output, and dis/charging power in a week (a) April (b) July (c) December

그림 3(b)를 살펴보면, 4450~4560[hr]구간의 오후 시간대에서는 일반적으로 태양광 에너지의 출력이 높기 때문에 신재생 에너지의 출력이 부하 수요에 충분히 공급할 수 있었다. 또한, 여분의 신재생 에너지가 발생함에 따라 ESS의 충

전 가능한 전력만큼 충전을 수행하고, 4495[hr]와 4574[hr]구간에서는 여분의 신재생 에너지가 많이 발생한 경우에는 SOC는 최대 충전 가능한 용량인 SOC<sub>max</sub>만큼 충전이 이루어졌다. 하지만 일몰 시간대에서는 태양광 에너지의 출력이 거의 발생하지 않고 풍력 발전의 출력량에 의존하게 된다. 이 때 ESS가 단독 운전이 가능한 충분한 SOC값을 유지하고 있다면 부하 수요를 충족할 수 있었다. 그러나 계속되는 방전으로 SOC<sub>min</sub>에 머무르게 되면서 충전이 필요로 하며, ESS의 백업 전원인 디젤 발전기나 계통에서 공급되는 전력을 통해 부하 수요를 충족할 수 있었다. 그림 3(c)에서 볼 수 있듯이 겨울철에는 여름에 비해 비교적 적어진 일사량으로 인해 전반적으로 태양광 에너지의 출력이 감소되었다. 따라서 겨울에는 여름보다 풍력 발전의 출력이 거의 의존되기 때문에 ESS의 충.방전 횟수가 감소되고 디젤 발전기의 기동은 잦아졌다.

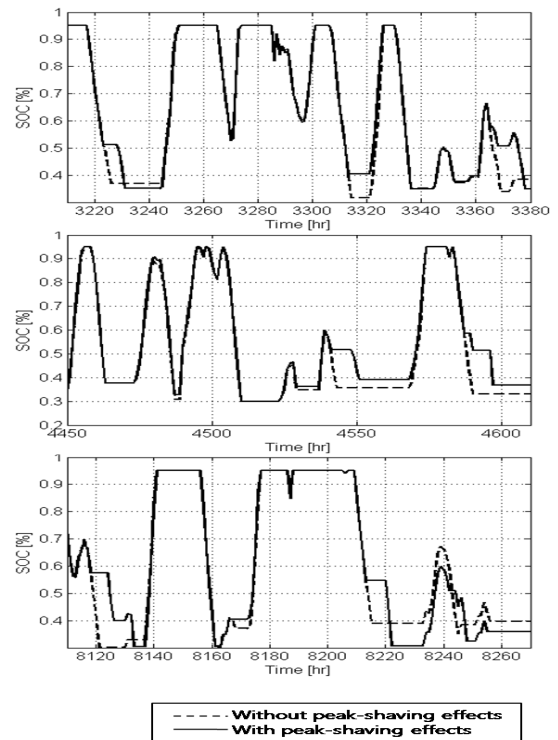


그림 4 첨두부하절감 효과를 고려하기 전.후의 주간 SOC (a) 4월 (b) 7월 (c) 12월

Fig. 4 SOC with/without peak-shaving effects in a week (a) april (b) July (c) December

최종적으로 제안한 알고리즘에서 부하 수요의 첨두부하 시간대를 고려함으로써 ESS의 전력 공급량의 효율성을 제고시켰다. 그림 4와 그림 5에서는 첨두부하절감 효과를 반영하기 전과 후의 SOC 및 충.방전량을 계절별로 나타내고 있다. 그림 3(b)를 살펴보면, 태양광 에너지는 일반적으로 오후 시간대에서는 비교적 높은 출력을 나타내고 있지만 4550[hr] 또는 4560[hr]과 같이 갑작스러운 기상 변화로 인

해 일사량이 부족하게 되면 태양광 에너지의 출력량이 낮아져 ESS의 방전이 필요하게 되었다. 첨두부하절감 효과를 고려함으로써 ESS는 방전 가능한 SOC 수준을 유지하고 있었기 때문에 이전 구성과 달리 ESS로부터 각각 약 1000[kWh], 2000[kWh]를 방전 가능케 하였다.

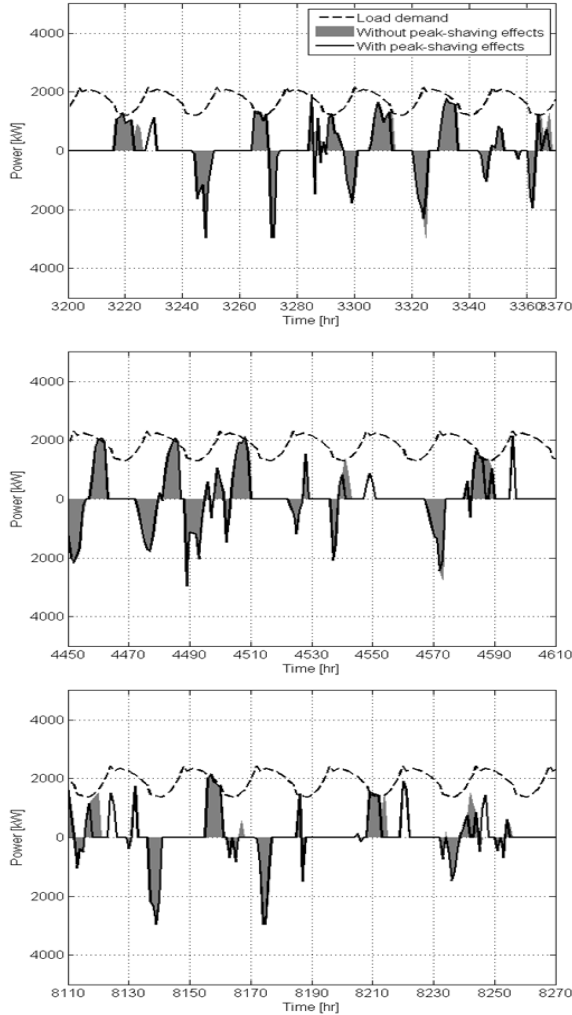


그림 5 첨두부하절감 효과 고려하기 전,후, 주간 부하, 총.방전 전력 출력량 (a) 4월 (b) 7월 (c) 12월

Fig. 5 Load demand, charging and discharging power in a week with/without peak-shaving effects (a) April (b) July (c) December

그림 6(b)에서는 첨두부하절감 효과를 고려한 신재생 에너지, ESS, 그리고 디젤 발전기의 최적 구성 결과를 나타낸다. 그 결과 그림 6(a)에서는 이러한 구성을 바탕으로 연간 부하에 차지하는 전력 소비량은 신재생 에너지, 디젤 발전기, ESS의 발전 순으로 평가됨을 확인되었다. 첨두부하 시간대를 고려하지 않고 이루어진 구성과 비교 해보았을 때, 증감율에 따르면 ESS의 연간 횟수와 일일 평균 충.방전량, 그리고 일일 평균 디젤 발전기 소비량은 약 0.3%, 전기 에너지 가격에서도 약 0.8% 증가하였다. 첨두부하절감 효과를 갖는 ESS의 운용 방안을 통해 총.방전량과 디젤 발전기의 소비량, 그리고 전기 에너지의 가격 등은 이전과 유사하였으

나, 중간부하와 최대부하 시간대에 ESS의 방전량은 총 96517.44kW에서 573808.87kW으로 상당히 증가하였다. 피크 부하시간대 높아진 방전량에 따른 비용 효율적인 ESS 전력 공급이 이루어진 것을 볼 수 있다

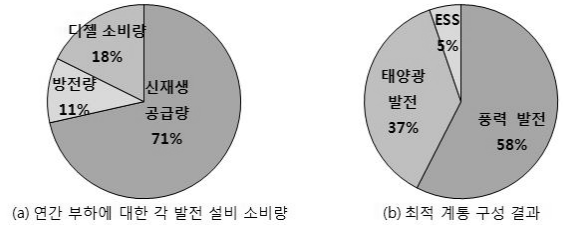


그림 6 (a) 연간 부하에 대한 각 발전 소비량 및 (b) 최적 계통 구성 결과

Fig. 6 (a) Ratio of each consumption to annual load and (b) results of optimal system configuration

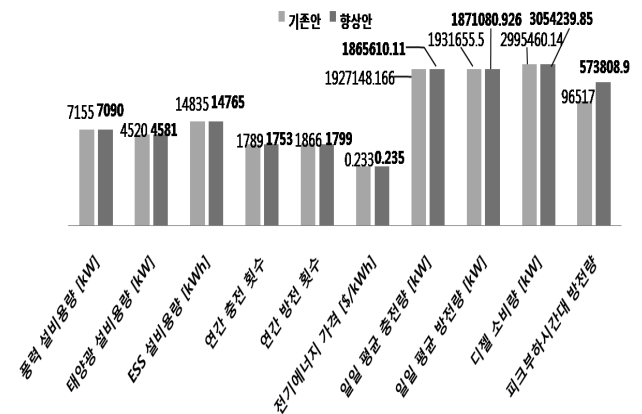


그림 7 첨두부하절감 효과를 고려하기 전,후의 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 7 Comparison results of the simulation with/without peak-shaving effects

## 6. 결론

신재생 에너지원의 예측이 불가능하고 불안정한 출력 공급과 같은 문제점을 보완하기 위해 ESS를 도입한다. 본 논문에서는 부하 추종을 기반으로 한 신재생 에너지원의 간헐적 특성을 고려하여 도입된 ESS의 최적 구성을 제안하였다. 제한한 최적 구성 알고리즘을 기반으로 구성된 계통에서는 짧은 시간 내에 ESS의 기동이 가능하기 때문에 신재생 에너지의 출력량을 효율적으로 공급할 수 있도록 향상시키고, 불안정할 수 있는 전력 공급을 보완하였다. 첨두부하절감 효과를 고려한 ESS의 충.방전의 수행을 통해 높은 부하 수요에 대응할 수 있었다. 또한, 계통을 구성하는 각 발전 설비의 경제성을 평가하기 위해 최소 전기 에너지 가격을 결정하였고, 이는 경제적이고 효율적으로 운영 가능한 풍력 및 태양광 발전, ESS를 구성할 수 있었다. 향후 ESS의 도입은 설치 목적과 주변 설비에 따라 구성함으로써 다양한 이익을

산출할 수 있기 때문에 다목적용 고려한 연구가 이루어질 수 있다. 또한, ESS는 충.방전 횟수에 따라 수명에 영향을 미치며, 이것은 ESS의 적정 교체주기를 고려한 충.방전 수행이 이루어진다면 보다 향상된 결과를 도출할 수 있다.

**감사의 글**

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0017064).

**References**

[1] A. Oudalov, D. Chartouni, C. Ohler, and G. Linhofer, "Value analysis of battery energy storage applications in power systems," IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, p.2206 - 2211, 2006.

[2] Robert J. Kerestes, Gregory F. Reed, and Adam R. Sparacino, "Economic analysis of grid level energy storage for the application of load leveling", IEEE Power and Energy Society General Meeting, p.1-9, 2012.

[3] Naveen G, Pramod Kumar B, and Dr.M L Sudheer, "Demand side load leveling using distributed micro energy and storage systems with the establishment of micro grids", IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), p.1-6, 2013.

[4] Hwa-chang Song, "Long-term and Periodic operation plan for a high-capacity battery system in power system", KIEE, Vol.61 No.4, p.27-32, 2012.

[5] D.B.Nelson, M.H.Nehrir, C.Wang, "Unit sizing of stand-alone hybrid Wind/PV/Fuel cell power generation systems", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol.3, p.2116-2122, 2005.

[6] S.Tafreshi, H.Zamani, S.M.Ezzati, M.Baghdadi, H.Vahedi, "Optimal unit sizing of distributed energy resources in microgrid using genetic algorithm", ICEE 18th Iranian Conference, p.836-841, 2010.

[7] Na-eun Lee, Wook-won Kim, Sang-min Woo, Jun-hyun Shin, and Jin-o Kim, "Optimal configuration for integration of renewable energy sources in the islanded microgrid", GMSARN International conference on Green Economy with Energy, Environmental & Social Responsibility 2012.

[8] Sang-min Woo, Sung-hun Lee, Hyeong-geun Gwak, Seong-yeol Kim, Hyeonil Son, Jin-o Kim, "A study on optimal hybrid-renewable energy configuration of islanded microgrids", Journal of the Korean Solar Energy Society Proceedings 2012, Vol.3 p.511-515, 2012.

[9] Hyeong-jun Park, Chan-su Jeong, "Economic

Analysis of High-Efficiency Production Facilities using Capital Recovery Factor", KIEE, Vol.21 No.7 p.117-123 1229-4691, 2007.

[10] Ricardo de Castro, Claudio Pinto, Rui Esteves Araujo, Pedro Melo, and Diamantino Freitas, "Optimal Sizing and Energy Management of Hybrid Storage Systems", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), p.321-326, 2012.

**저 자 소 개**



**이 나 은 (李 娜 恩)**

2012년 동아대 전기공학과 졸업. 현재 한양대 대학원 전기공학과 석박사통합과정  
Tel : 02-2220-0347  
E-mail : lee05260@hanyang.ac.kr



**김 옥 원 (金 旭 源)**

2008년 8월 한양대학교 전자전기컴퓨터 공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석박사통합과정  
Tel : 02-2220-0347  
E-mail : neocruser@hanyang.ac.kr



**김 진 오 (金 鎭 吾)**

1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업 (공학박). 현재 한양대 전기공학과 정교수  
Tel : 02-2220-0347  
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr