

# 국가적 관점에서 용도별 ESS 적정용량 산정을 위한 운전수리모델 수립에 대한 연구

## A Study on Establishing Operation Mathematical Model for Optimum Capacity Estimation of the ESS Applications for each in the Nationwide Perspective

김정훈\* · 윤석민\*  
(Jung-Hoon Kim · Seok-Min Youn)

**Abstract** - Around the world are increasing the demand for ESS. Currently, the domestic is expected to benefit by operating ESS. In the domestic, it is expected to benefit from operations of the installed ESS because of the introduction of ESS less capacity. However ESS capacity to the maximum profit occurs is unknown. ESS is different from the charge-discharge characteristics and the reserve to replace, depending on the application. Therefore, it should be established in accordance with the ESS optimal capacity according to the purpose used because it can maximize the quality and efficiency of the electric energy. To the ESS optimal capacity estimation by the purpose used, It should compare the investment cost caused by ESS facility installation and operation cost caused by operating ESS. In this paper, the operation mathematical model for estimating marginal operation costs established. In operation mathematical model, operating cost is considered fuel cost and no-load cost start-up cost. Because no-load cost and start-up cost are not related to cost and power plant output, there are expressed an integer variable costs as a step function.

**Key Words** : ESS(Energy Storage System), Optimal capacity, Operation mathematical model, Marginal cost, Frequency regulation, load leveling, Renewables

### 1. 서 론

전력 공급과 수요를 항상 일치시키던 기존의 교류 전력계통에 저장 가능한 ESS(Energy Storage System)가 경제성이 좋아지면서 계통에 도입됨에 따라 전 세계에서는 저장장치 기술을 선점하려고 하고 있다. 이러한 저장장치 중 저장능력과 속응성이 좋은 ESS는 예비력 대체와 발전설비 회피가 가능하며 속응성을 이용하는 주파수조정용부터 경제성이 확보되면서 각국에서 앞 다투어 설치를 하고 있고 신재생에너지용 ESS와 부하평준화용 ESS도 곧 보급이 될 것으로 전망된다. 이에 따라 3가지 용도의 ESS의 기술 확보와 보급을 추진하기 위하여 지원금을 주기 시작하고 있다.

전 세계적으로 ESS 설치장소는 2016년 3월 현재 총 840개소이고 이 중 184개소가 주파수조정용 ESS, 401개소가 신재생에너지용 ESS, 211개소가 부하평준화용 ESS이며 총 용량이 2,293 MW이다[1]. 미국 캘리포니아주에서는 2010년 9월에 ESS 의무화 법안을 제정하여 2014년부터 전력회사 공급전력의 2.25%, 2020

년부터 5% 수준을 강제화했고 그 결과 PG&E에서 주파수조정용 ESS를 2012년 8월 Vacaville 지역에 20MW와 2013년 5월 San Jose 지역에 40MW를 설치하여 운영하고 있다[2]. 일본에서는 2011년 대지진 이후 원전의 대안으로 신재생에너지원이 급부상하면서 불규칙한 출력을 보완해 줄 수 있는 ESS도 지원 정책에 포함되면서 북해도 Rokkasho 풍력발전소에 34MW와 Wakanai 태양광 발전소에 1.5MW가 건설되었다[3].

우리나라에서는 전 세계 최대규모의 주파수조정용 ESS를 2014년 12월에 서안성 변전소에 28MW, 신용인 변전소에 24MW를 설치하여 운영하고 있다[4]. 이러한 주파수조정용 ESS는 2016년 6월 3일에 한빛 원전 2호기(1,022MW)의 돌발정지 사고가 발생하였을 때 9분 동안 주파수 조정하여 계통을 안정시킨 사례가 있다. 이때 비용평가위원회에서는 원전 정지로 추가 발생하는 연간 총 전력생산비용인 1조 1784억원(2013년 기준)을 줄이는 효과가 있을 것으로 추정하였다[5]. 이러한 효과로 한전에서는 주파수조정용 ESS를 2016년 3월까지 236MW를 구축[6]하였고 2017년까지 단계적으로 500MW급 주파수조정용 ESS설비를 설치 운영할 계획을 가지고 있다[4]. 또한 스마트그리드협회에서는 스마트그리드 보급지원사업의 일환으로 부하평준화용 ESS등 설치비용의 70%까지 지원해주는 사업을 추진[7]하고 있다.

이와 같이 국내외 국가에서는 ESS 기술 확보를 위해 보급을 장려하는 차원에서 설치를 지원하고 있기 때문에 ESS는 도입 초기 단계임에도 불구하고 경제성을 조기에 확보할 것으로 전망된

† Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Hongik University, Korea  
E-mail : kimjh@hongik.ac.kr

\* Dept. of Electricity Control System Engineering, Hongik University, Seoul, Korea  
E-mail : ysm515@mail.hongik.ac.kr

Received : November 16, 2015; Accepted : April 29, 2016

다. 하지만 국가적 관점에서는 ESS가 필요이상 도입되면 낭비이기 때문에 적정용량 산정에 대한 연구가 요청되는 시점이다.

이러한 국내외의 ESS 용량산정에 대한 기존의 대표연구로는 Daniel S. Kirschen 교수의 독립된 통신 시설을 대상으로 강한 최적화기법(Robust Optimization)을 사용한 연구[8]가 있다. 이 연구에서는 계통과 연계되지 않은 연료전지의 연료교체비용만을 운전비로 고려하는 한계점이 있기 때문에 기존 발전설비 및 ESS 설비운전 시 운전비를 고려해야하는 국가적 관점에서의 연구로 사용할 수 없다. 또 다른 연구로는 조성민 박사의 PSO(Particle Swarm Optimization) 기법을 사용하여 부하평준화용 ESS를 수용가에 도입하였을 때 적정용량을 산정한 연구가 있다[9]. 이 연구에서는 적정용량 산정과정에 개개의 수용가를 대상으로 운전비를 전기요금으로 고려하였고 변수로는 ESS 정격출력과 용량만 적용하였기 때문에 국가적 관점으로 확대 적용하기 어렵다.

한편 국가적 관점에서 다른 전원에 대해 적정용량을 산정한 연구로는 국가전원계획모델에 SMES[10]와 열병합발전설비를 설계하는 연구[11]가 있다. 이 연구들에서는 국가전원계획모델에서 모든 비용함수는 선형모델이기 때문에 이에 맞추기 위하여 연료비를 선형화 하여 사용하고 있고 연초의 가치로 환산하여 사용하였다. 기존의 연구에서 발전설비는 변동하는 부하와 일치시켜 발전하였지만 ESS는 설치기간이 짧아 계절별 투자가 가능하여 이를 반영한 새로운 수리모델을 수립해야 할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 국가적 관점에서 용도별 ESS 적정용량을 산정하기 위해 우선적으로 용도별 ESS 운전수리모델을 수립하는 것을 목적으로 한다. 이때 용도별 ESS 운전수리모델은 기존의 국가전원계획모델에 계절별로 ESS 설비를 설치할 수 있도록 반영하였고 운전비는 연료비외에 무부하비와 기동·정지비로 고려하였다. 운전비 중 무부하비와 기동·정지비는 발전소 출력과 관계없는 비용이기 때문에 정수형 변수를 계단함수로 표현하였다. 또한 기존의 운전수리모델은 1년 단위로 비용을 환산하여 사용하였지만 본 논문에서는 계절에 따라 ESS 투자가 일어나는 것을 고려하여 부하곡선 및 발전소의 최대출력에 따른 ESS 운전 효과를 계절 단위로 구성한 새로운 운전수리모델을 수립하였다. 최종적으로 사례연구를 통해 3가지 용도의 ESS 중 대표로 주파수조정용 ESS를 대상으로 하여 한계운전비 산정결과를 제시한다.

## 2. 용도별 ESS 운전수리모델 수립 및 한계운전비

본 논문에서는 3가지 종류(주파수조정용, 부하평준화용, 신재생에너지용)의 ESS의 적정용량을 결정하기 위하여 용도별 ESS 특성을 고려한 운전수리모델을 수립한다.

### 2.1 주파수조정용 ESS 특징과 운전수리모델

#### 2.1.1 주파수조정용 ESS 특징

전력계통에서는 변동성 부하를 발전소 출력과 항상 일치시켜

야 주파수를 일정하게 유지할 수 있다. 이러한 주파수는 2초단위로 측정되기 때문에 일정하게 제어하기 위해서는 출력을 빠르게 제어할 수 있는 속응성이 필수적이다. 이를 위해 기존의 발전소에서는 그림 1과 같이 예비력을 확보하고 있고 이 중 주파수조정은 주파수유지예비력(G/F)과 주파수복구예비력(AGC)으로 이루어지고 있다. 이 두 가지 예비력을 합쳐 주파수조정예비력이라 하며 현재 계통에 병입하여 운전하는 발전소(원자력 제외)중 일부의 입찰공급가능 용량을 95%로 제한하여 확보하고 있다[12].

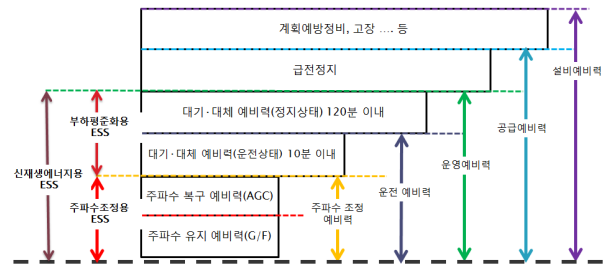


그림 1 예비력의 종류 [12]

Fig. 1 Kind of Reserve [12]

주파수 제어는 ms단위의 빠른 응답특성과 저장능력을 가진 ESS, 슈퍼커패시터, 플라이휠이 대체 할 수 있다. 이 중 슈퍼커패시터와 플라이휠은 각각 자기 방전율이 2~40%/day, 20~100%/day로 인해 손실이 크고 에너지밀도가 0.1~15 Wh/kg, 5~130 Wh/kg으로 낮다. 이에 반해 ESS는 자기 방전율이 0.1~0.3%/day에 불과하고 에너지밀도도 75~250 Wh/kg으로 비교적 높기 때문에 주파수조정을 위한 장치로 적합하다[13].

주파수조정을 위해 ESS가 제어될 경우 주파수 변동 신호는 2초단위로 주어지기 때문에 잦은 충·방전 특성이 나타난다. 이로 인해 수명이 감소되는 것을 방지하기 위하여 주파수조정을 하지 않는 불감대가 설정되고 있다. 주파수가 증가하여 불감대를 넘어나면 ESS는 주파수를 감소시키기 위해 계통의 과잉전력을 저장하게 되고 주파수가 감소하여 불감대를 넘어나면 ESS는 주파수를 증가시키기 위해 계통에 방전하여 부족한 전력을 공급한다. 또한 낮은 SOC(State of Capacity)에서 운전 시 수명이 감소되기 때문에 경제성에 의하여 방전한계를 설정한다. 본 논문에서는 기존의 연구[14]에서 주파수, SOC에 대한 특성을 반영하여 수립한 주파수조정용 ESS 출력제어 방법을 사용하였다.

주파수조정용 ESS 도입 시 주파수조정 예비력을 대체 할 수 있기 때문에 주파수조정을 하는 발전소의 입찰공급가능 용량을 제한할 필요가 없어지게 되어 최대출력이 증가하게 된다. 이로 인해 첨두부하를 담당하던 고원가 발전연료의 발전소는 출력이 줄어들고 무부하 운전상태가 되거나 또는 운전을 정지할 수 있기 때문에 운전비 및 발전설비회피 편익이 발생한다. 이때 국가적으로 확보해야하는 주파수조정예비력과 대기대체예비력을 고려[12]하여 발전소 운전상태를 결정하였고 운전비는 연료비, 무부하비, 기동·정지비 3가지 항목으로 세분화하여 운전수리모델을 수립하였다.

### 2.1.2 주파수조정용 ESS 목적함수

목적함수인 운전비는 연료비, 무부하비, 기동·정지비로 고려하였고 계절과 일형에 따라 부하와 운전할 수 있는 발전소군 및 최대출력이 달라지기 때문에 계절을  $s$ , 일형을  $d$  첨자로 표현하여 식 (1)과 같이 구성하였다.

$$MinO.C_{f/r ESS} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{d=1}^{N_d} (C_{fuel,f/r ESS}^{sd} + C_{no,f/r ESS}^{sd} + C_{start,f/r ESS}^{sd}) \quad (1)$$

#### 1) 연료비

연료비는 연료비 단가와 발전소군별 출력의 곱으로 나타내어 지는데 이중 연료비 단가는 2차 함수 형태이지만 국가전원개발모델에 적용하기 위해 선형화하여 사용한다. 발전소군별 출력은 주파수조정 유무에 따라 주파수조정을 하는 발전소군( $j$ )과 하지 않는 발전소군( $i$ ) 분류하여 표현하였다.  $j$  발전소군의 출력은 ESS용량, 주파수 및 SOC에 따라 최대출력 및 출력이 달라지기 때문에 나머지 발전소군( $i$ )의 출력도 달라진다. 이를 식 (2)와 같이 나타냈다.

$$C_{fuel,f/r ESS}^{sd} = \left[ \sum_{i=1}^{N_i} C_{fuel,i,f/r ESS}^{sd} (P_{i,f/r ESS}^{sd} (P_{n,f/r ESS})) \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{N_j} C_{fuel,j,f/r ESS}^{sd} (P_{j,f/r ESS}^{sd} (P_{n,f/r ESS}, \Delta f, SOC)) \right] \cdot \Delta T^t \quad (2)$$

#### 2) 무부하비

무부하비는 발전소군의 출력과 무관하게 드는 비용으로 발전소군별 무부하비 단가와 무부하 운전시간의 곱으로 구성된다. 발전소가 기동하는 순간부터 정지할 때까지 일정하게 시간당 발생하기 때문에 단위계단함수를 사용하여 표현하였다. 이중 무부하비 운전시간은 ESS 용량과 주파수에 따라 달라지고 발전소군을 2가지로 세분화하였기 때문에 식 (3)과 같이 구성하였다.

$$C_{no,f/r ESS}^{sd} = \sum_{t=1}^{N_t} \left[ \sum_{i=1}^{N_i} C_{no,i,f/r ESS}^{sd} \cdot \left( \sum_{k=1}^{N_k} u(t-t_{up,i,k}^{sd} (P_{n,f/r ESS}, \Delta f)) \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_{l=1}^{N_l} u(t-t_{down,i,l}^{sd} (P_{n,f/r ESS}, \Delta f)) \right) \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{N_j} C_{no,j,f/r ESS}^{sd} \cdot \left( \sum_{k=1}^{N_k} u(t-t_{up,j,k}^{sd} (P_{n,f/r ESS}, \Delta f)) \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_{l=1}^{N_l} u(t-t_{down,j,l}^{sd} (P_{n,f/r ESS}, \Delta f)) \right) \right] \cdot \Delta T^t \quad (3)$$

#### 3) 기동·정지비

기동·정지비는 발전소가 기동 또는 정지 시에 1회성으로 발생하는 비용으로 계산의 편의를 위해 기동 시에만 발생한다고 가정하였다. 또한 1회성 비용이기 때문에 무부하비와는 달리 운전시간을 곱하지 않고 단위계단함수를 사용하였고 발전소군을 2가지로 세분화하였기 때문에 각각 표현하여 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$C_{start,f/r ESS}^{sd} = \sum_{i=1}^{N_i} C_{start,i,f/r ESS}^{sd} \cdot \sum_{k=1}^{N_k} (u(t-t_{up,i,k}^{sd} (P_{n,f/r ESS}, \Delta f)) \\ - u(t-\Delta T^t - t_{up,i,k}^{sd} (P_{n,f/r ESS}, \Delta f))) \\ + \sum_{j=1}^{N_j} C_{start,j,f/r ESS}^{sd} \cdot \sum_{l=1}^{N_l} (u(t-t_{up,j,l}^{sd} (P_{n,f/r ESS}, \Delta f)) \\ - u(t-1-t_{up,j,l}^{sd} (P_{n,f/r ESS}, \Delta f))) \quad (4)$$

### 2.1.3 주파수조정용 ESS 제약조건

#### 1) 수급조건

ESS가 도입됨에 따라 각 발전소군의 출력이 계절, 일형, 시간대 및 ESS 용량에 따라 변한다. 부하는 계절, 일형 및 시간대에 따라 달라진다. 따라서 전력수급을 맞춰주기 위해 각 발전소군의 출력이 계절, 일형, 시간대에 따라 달라져야 하고 ESS 도입 시에는 ESS 용량에 대해서도 변동한다. 이를 식 (5)와 같이 구성하였다.

$$\sum_{i=1}^{N_i} P_{i,f/r ESS}^{sd} (P_{n,f/r ESS}) + \sum_{j=1}^{N_j} P_{j,f/r ESS}^{sd} (P_{n,f/r ESS}) = P_L^{sd} \quad (5)$$

#### 2) 발전소군의 출력에 대한 제한조건

발전소군은 최소/최대 출력의 범위가 한정되어 있기 때문에 이를 제약조건으로 식 (6)과 같이 반영하였다. 주파수조정을 하는 발전소군의 경우 주파수조정 예비력만큼 출력 여유분을 두기 때문에 이를 ESS가 담당하게 되면 최대출력이 증가한다. 따라서 주파수조정을 하는 발전소군의 경우 최대출력은 ESS 용량과도 관계가 있고 이를 식 (7)과 같이 나타내었다.

$$P_{i,min,ESS}^{sd} \leq P_{i,ESS}^{sd} (P_{n,f/r ESS}) \leq P_{i,max,ESS}^{sd} \quad (6)$$

$$P_{j,min,ESS}^{sd} \leq P_{j,ESS}^{sd} (P_{n,f/r ESS}) \leq P_{j,max,ESS}^{sd} (P_{n,f/r ESS}) \quad (7)$$

#### 3) 주파수와 SOC에 따른 ESS 충·방전 전력

주파수조정용 ESS 충·방전 전력은 정격출력과 주파수, SOC에 대한 특성을 반영하여 기존의 연구[14]에서 수립한 ESS 출력 제어 방법을 사용하였다.

#### 4) 예비력 제약조건

대기대체 예비력은 기간에 따라 최소 확보량이 달라진다. 그리고 주파수조정 예비력을 대체하기 때문에 주파수조정 예비력 이상으로 설비를 설치할 경우 경제성이 없다. 따라서 예비력 제약조건을 식(8), (9)와 같이 나타내었다.

$$R_{F/R} \geq P_{F/R,ESS}^{sd} (P_{n,ESS}) \quad (8)$$

$$P_{O,ESS}^{sd} (P_{n,ESS}) \geq R_O^s \quad (9)$$

#### 5) 주파수조정용 발전소 출력과 ESS 충·방전 전력

각  $m$  ESS군의 충·방전 전력의 합과 주파수조정을 하는  $j$  발전소군의 줄어드는 충·방전 전력의 합이 같다. 이를 식(10), (11)과 같이 나타내었다.

$$\sum_{m=1}^{N_m} P_{m, f/r ESS}^{sdt}(\Delta f^{sdt}, SOC) \quad (10)$$

$$= \sum_{j=1}^{N_j} P_{j, f/r ESS}^{sdt}(\Delta f^{sdt}, SOC) = P_{f/r ESS}^{sdt}(\Delta f^{sdt}, SOC)$$

$$\sum_{j=1}^{N_j} P_{j, n f/r ESS}^{sdt} = \sum_{k=1}^{N_k} P_{k, n f/r ESS}^{sdt} = P_{n f/r ESS}^{sdt} \quad (11)$$

## 2.2 신재생에너지용 ESS 특징 및 운전수리모델

### 2.2.1 신재생에너지용 ESS 특징

신재생에너지는 전력생산을 제어할 수 없고 1분 출력변동률이 최대 87%[15]로 출력이 불안정하기 때문에 계통에 연계하면 기존 발전소 출력의 급격한 변동을 초래하고[16] 출력변동만큼 예비력을 추가적으로 확보해야하는 문제점[17]이 있다. 이러한 이유로 정부에서는 계통안정을 위해 신재생에너지의 계통연계 시 1분 출력변동률을 10% 이내로 제한하는 법안을 개정하였고 이로 인해 신재생에너지 출력을 제어해야한다.

신재생에너지 출력 제어방법은 하루단위로 총·방전하는 부하평준화 제어방법과 초단위로 총·방전하는 출력안정화 제어방법으로 세분할 수 있다. 이 중 부하평준화 제어방법은 부하평준화용 ESS와 같이 때문에 생략한다. 출력안정화 제어방법은 빠른 속응성을 가진 Pitch제어 방법과 ESS를 사용한 방법이 사용되고 있다. Pitch 제어방법은 손실전력이 약 22%, ESS 제어방법은 약10%이기 때문에 경제성이 좋은 ESS가 출력안정화 제어방법으로 적합하다[15]. 이러한 신재생에너지용 ESS의 제어방법은 기존의 연구에서 사용한 기준출력(예측값)과 실제출력을 비교하고 SOC를 고려하여 ESS 출력을 결정하는 기준출력 산정법[15]를 사용하였다.

ESS 도입 시 신재생에너지의 불안정한 출력으로 인해 추가적으로 확보해야하는 대기대체예비력 3,206MW를 줄일 수 있다[17]. 그 결과 예비력확보를 위해 무부하 운전상태인 발전소의 운전을 정지 할 수 있기 때문에 운전비 및 발전설비 회피편익이 발생한다. 이때 국가적으로 확보해야하는 대기대체예비력(운전상태)를 고려하여 발전소 운전상태를 결정하였고 운전비는 연료비, 무부하비, 기동·정지비 3가지 항목으로 세분화하여 운전수리모델을 수립하였다.

### 2.2.2 신재생에너지용 ESS 목적함수

구간별 운전비의 총합을 최소화하는 목적함수를 식 (12)와 같이 나타내었다.

$$Min O.C_{RESS} = \sum_{s=1d}^{N_s} \sum_{l=1}^{N_l} (C_{fuel,RESS}^{sd} + C_{no,RESS}^{sd} + C_{start,RESS}^{sd}) \quad (12)$$

#### 1) 연료비

연료비는 연료비 단가와 발전소군별 출력의 곱으로 나타내어 지는데 이 중 연료비 단가는 선형화하여 사용하였다. 각 발전소군의 출력은 신재생에너지 출력과 ESS의 용량에 따라 달라지고 이

러한 변동하는 출력에 따라 연료비가 결정된다. 이를 식 (13)과 같이 나타내었다.

$$C_{fuel,RESS}^{sd} = \sum_{t=1g}^{N_t} \sum_{g=1}^{N_g^*} C_{fuel,g,RESS}^{sd} (P_{RE}^{sdt}, P_{n,RESS}^{sdt}) \cdot \Delta T^t \quad (13)$$

#### 2) 무부하비

무부하비는 발전소군별 무부하비 단가와 무부하 운전시간의 곱으로 구성된다. 이 중 무부하비 운전시간은 ESS의 총·방전 전력에 따라 발전소의 운전이 정지할 수 있기 때문에 단위계단함수를 사용하여 식 (14)와 같이 표현하였다.

$$C_{no,RESS}^{sd} = \sum_{t=1g}^{N_t} \sum_{g=1}^{N_g^*} [C_{no,g,RESS}^{sd} \cdot [\sum_{p=1}^{N_p^{sd}} u(t-t_{up,p}^{sd}(P_{RE}^{sdt}, P_{n,RESS}^{sdt})) - \sum_{q=1}^{N_q^{sd}} u(t-t_{down,q}^{sd}(P_{RE}^{sdt}, P_{n,RESS}^{sdt}))]]] \cdot \Delta T^t \quad (14)$$

#### 3) 기동·정지비

기동·정지비는 1회성 비용이기 때문에 단위계단함수를 사용하여 식 (15)와 같이 구성하였다.

$$C_{start,RESS}^{sd} = \sum_{t=1g}^{N_t} \sum_{g=1}^{N_g^*} C_{start,g,RESS}^{sd} \cdot \sum_{p=1}^{N_p^{sd}} [u(t-t_{up,p}^{sd}(P_{RE}^{sdt}, P_{n,RESS}^{sdt})) - u(t-t_{up,p}^{sd}(P_{RE}^{sdt}, P_{n,RESS}^{sdt}) - 1)] \quad (15)$$

## 2.2.3 신재생에너지용 ESS 제약조건

### 1) 수급조건

신재생에너지 발전소는 전력생산 비용이 없기 때문에 기저발전소가 되어 부하를 삭감한다. 이를 식 (16)과 같이 나타내었다.

$$P_{L,R}^{sdt} = P_L^{sdt} - (\Delta P_{RE}^{sdt}) \quad (16)$$

### 2) 발전소군의 출력에 대한 제한조건

발전소군은 최소/최대 출력의 범위가 한정되어 있기 때문에 이를 제약조건으로 식 (17)과 같이 반영하였다.

$$P_{g,\min,ESS}^{sd} \leq P_{g,ESS}^{sdt}(P_{n,RESS}^{sdt}) \leq P_{g,\max,ESS}^{sd} \quad (17)$$

### 3) 예기치 못한 신재생에너지 출력 변동량

신재생에너지의 출력은 불규칙적이기 때문에 기준출력과 실제 출력의 차이를 식 (18)과 같이 나타내었다.

$$\Delta P_{RE}^{sdt} = P_{RE}^{sdt} - P_{r,RE}^{sdt}(P_{n,RESS}^{sdt}, SOC) \quad (18)$$

4) ESS 총·방전 전력

식 (18)의 차이만큼 ESS가 보정해주어야 한다. 하지만 ESS 최대 총·방전전력을 넘어날 경우 그 이상 총·방전할 수 없기 때문에 두 구간으로 나누어 식 (19)와 같이 구성하였다.

$$P_{RESS}^{sdt} = \begin{cases} \Delta P_{RE}^{sdt}, & \Delta P_{RE}^{sdt} < P_{n,RESS} \\ P_{n,RESS}, & \Delta P_{RE}^{sdt} > P_{n,RESS} \end{cases} \quad (19)$$

5) 예비력 제약조건

신재생에너지용 ESS의 예비력 제약조건은 주파수조정용 ESS와 동일하기 때문에 생략한다.

6) 풍력단지의 ESS설비용량 제약조건

‘제주특별자치도 풍력발전사업허가 및 지구지정 등에 관한 조례’에서 풍력발전설비 용량의 10%이상을 ESS로 설치해야 한다는 조항을 근거로 식 (20)과 같이 결정하였다.

$$P_{n,RESS} \geq 10\% \cdot P_{c,RE} \quad (20)$$

7) 신재생에너지 계통연계를 위한 1분 출력변동을 제한

‘송배전용 전기설비 이용 규정 - 신재생발전기 계통연계기준’에서 1분 출력변동률을 10%이내로 제한하는 것이 가능해야 신재생발전기를 계통연계 할 수 있다는 조항을 근거로 식 (21)과 같이 결정하였다.

$$-10\% \leq \frac{P_{r,RE}^{sdt} - P_{r,RE}^{sdt(t-1분)}}{P_{c,RE}} \leq 10\% \quad (21)$$

2.3 부하평준화용 ESS 특징과 운전수리모델

2.3.1 부하평준화용 ESS 특징

매년 평균 4.1% 증가하는 첨두부하[18]에 맞추어 전력을 공급하기 위해 발전설비를 건설하여 운전하고 있다. 하지만 첨두부하가 발생하지 않는 시간대에서는 무부하 운전을 하거나 정지하는 발전설비가 발생하는 문제점이 있다. 이를 해소하기 위한 방안으로 정부에서는 수요관리를 시행하고 있고 부하관리와 소비절약으로 세분화 되어 진다. 부하관리 중 저장능력을 이용한 부하평준화 방법은 대표적으로 양수발전소와 ESS를 사용한다. 양수발전소를 사용한 부하평준화 방법은 그림 2와 같이 발전단가가싼 시간에 에너지를 E만큼 저장하여 첨두부하 때, 즉 발전단가가 비싼 시간에 ηE만큼 방전한다. 이때 첨두부하를 삭감하여 첨두부하를 담당하던 고원이 발전연료의 발전소는 출력이 줄어들고 무부하 운전상태가 되거나 또는 기동을 정지할 수 있기 때문에 운전비 및 발전설비회피 편익이 발생한다.

하지만 양수발전소는 공사부지선정이 어렵고, 건설시 환경과파가 되기 때문에 현재 건설계획이 되어있지 않다. 반면 ESS는

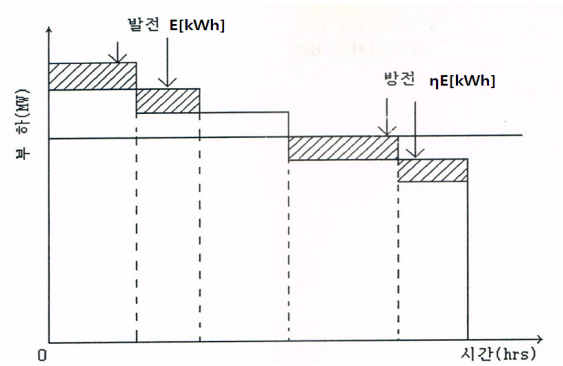


그림 2 양수발전소의 운전특성

Fig. 2 Operational Characteristics of Pumped Storage Power Plant

설치 공간 및 장소의 제약이 적고 효율 또한 양수발전소 75~85%에 비해 85~95%로 높다. 또한 ESS는 장주기로 총·방전 운전을 하는 특징이 양수발전소와 유사하기 때문에 기존의 양수발전소를 ESS가 대체하여 부하평준화 기능을 수행하기에 적합하다[10]. 따라서 ESS 운전특성을 양수발전과 동일하게 취급하고 운전비를 연료비로만 고려한 기존의 연구[10]를 개선하여 무부하비와 기동·정지비를 추가하여 부하평준화용 ESS 운전수리모델을 수립하였다.

2.3.2 부하평준화용 ESS 목적함수

구간별 운전비의 총합을 최소화하는 목적함수를 식 (22)과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{Min } O.C_{L/LESS} & \quad (22) \\ & = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{d=1}^{N_d} (C_{fuel,L/LESS}^{sd} + C_{no,L/LESS}^{sd} + C_{start,L/LESS}^{sd}) \end{aligned}$$

1) 연료비

연료비는 연료비 단가와 발전소군별 출력의 곱으로 나타내어 지는데 이중 연료비 단가는 선형화하여 사용하였다. 각 발전소군의 출력은 ESS의 총·방전 전력에 따라 달라지고 이러한 변동하는 출력에 따라 연료비가 결정된다. 이를 식 (23)과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} C_{fuel,L/LESS}^{sd} & \quad (23) \\ & = \left[ \sum_{g=1}^N C_{fuel,g,L/LESS}^{sd} (P_{g,L/LESS}^{sdt} (P_{c,L/LESS}^{sdt} \cdot P_{d,L/LESS}^{sdt})) \right] \end{aligned}$$

2) 무부하비

무부하비는 발전소군별 무부하비 단가와 무부하 운전시간의 곱으로 구성된다. 이중 무부하비 운전시간은 ESS의 총·방전 전력에 따라 발전소의 운전이 정지할 수 있기 때문에 단위계단함수를 사용하여 식 (24)와 같이 표현하였다.

$$C_{no, L/LESS}^{sd} = \sum_{t=1}^{N_t} \left[ \sum_{g=1}^{N_g} C_{no, t, L/LESS}^{sd} \cdot \left( \sum_{k=1}^{N_k} u(t - t_{up, g, k}^{sd}(P_{c, L/LESS}^{sdt}, P_{d, L/LESS}^{sdt})) - \sum_{l=1}^{N_l} u(t - t_{down, g, l}^{sd}(P_{c, L/LESS}^{sdt}, P_{d, L/LESS}^{sdt})) \right) \right] \cdot \Delta T^t \quad (24)$$

3) 기동·정지비

기동·정지비는 1회성 비용이기 때문에 단위계단함수를 사용하여 식 (25)와 같이 구성하였다.

$$C_{start, L/LESS}^{sd} = \sum_{g=1}^{N_g} C_{start, g, L/LESS}^{sd} \cdot \sum_{k=1}^{N_k} \left( u(t - t_{up, g, k}^{sd}(P_{c, L/LESS}^{sdt}, P_{d, L/LESS}^{sdt})) - u(t - \Delta T^t - t_{up, g, k}^{sd}(P_{c, L/LESS}^{sdt}, P_{d, L/LESS}^{sdt})) \right) \quad (25)$$

2.3.3 부하평준화용 ESS 제약조건

부하평준화용 ESS 운전수리모델에서 제약조건은 기존의 연구 [10]와 동일하기 때문에 생략한다.

2.4 한계운전비

한계운전비는 용도별 ESS의 정격용량이 한 단위[1MW] 증가하였을 때 발생하는 운전비와 공급지장비의 증분비용을 말하는 것으로 ESS 설비의 투자결정에 있어 중요한 지표가 된다. 한계운전비(λ)가 한계투자비(μ)보다 크면 경제적 이득이 있으므로 ESS의 정격용량을 더 증가시키고, λ가 μ보다 작으면 손해가 발생하므로 정격용량을 줄여야 한다. 즉 λ=μ일 때 최적상태가 되고 이때의 ESS 용량을 적정용량으로 판단한다. 이 과정을 그림 3과 같이 표현하였고 이 중 본 논문에서는 운전수리모델인 회색 부분의 수립을 제안하였다.

$$\frac{\partial O.C_{ESS}}{\partial P_{nESS}} = \lambda, \quad \frac{\partial I_{ESS}}{\partial P_{nESS}} = \mu \quad (26)$$

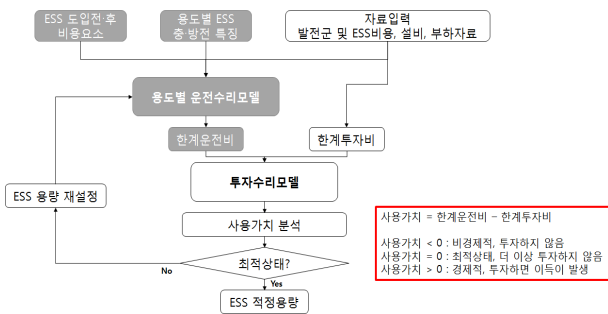


그림 3 용도별 ESS 적정용량산정을 위한 절차도

Fig. 3 Procedures for estimating ESS optimal capacity by type

3. 사례 연구

3.1 사례연구 방법

사례연구로는 용도별 ESS의 적정용량산정 방법이 같기 때문에 대표로 주파수조정용 ESS를 대상으로 하였다. 표 1의 부하와 표 2의 발전군이 투입되어 있는 계통을 대상으로 표 3의 주파수 분포의 평균과 표준편차를 매트랩의 난수발생 프로그램에 적용하여 2초단위로 발생시킨 불규칙적인 주파수를 사용하였다. ESS군, 발전소군과 부하간의 송전손실은 없고 ESS의 형식은 한가지 형태만 설치되어있다고 가정하고 사례연구를 수행하였다. 또한 각 발전군의 출력은 경제급전(우선순위법)에 의해서 결정하였고 표 4, 표 5의 입력자료를 적용하였다. 본 사례연구에서는 주파수조정용 ESS 운전수리모델에서 ESS만 변수로 취급하여 운전비 및 한계운전비를 산정하였다.

표 1 부하입력자료(MW)

Table 1 Input data of Load (MW)

시간	1	2	3	4	5	6
부하	44104	44184	43776	43568	43880	45008
시간	7	8	9	10	11	12
부하	46312	48784	53648	55728	56720	55800
시간	13	14	15	16	17	18
부하	55784	58784	58672	58696	57520	55544
시간	19	20	21	22	23	24
부하	54504	53832	52504	49832	47592	45800

표 2 발전소군 자료

Table 2 Input data generator group

발전소군	연료단가 (원/kW)	설비 (MW)
유류	153.13	3446
LNG	100.9	21336
무연탄	55.8	1125
유연탄(f/r)	36.91	23409
원자력	5.28	20716

표 3 주파수 분포 [13]

Table 3 Frequency Distribution [13]

구분	59.85 이하	59.90 ~ 59.95	59.95 ~ 60.00	60.00 ~ 60.05	60.05 ~ 60.10	60.10 이상
횟수	69	2,184	679,571	653,986	3,387	2
점유율	0	0.16	50.74	48.83	0.25	0

표 4 기간에 따른 대기대체예비력[12]

Table 4 cold-replacement reserve for period[12]

적용기간	구분	확보량
가. 동·하계전력수급대책기간	운전상태	1,500 MW 이상
	정지상태	1,000 MW 이상
나. “가.”이외의 기간	운전상태	1,000 MW 이상
	정지상태	1,500 MW 이상

표 5 기타 입력 자료

Table 5 Other Input data

	값	단위
규정주파수	60	Hz
불감대 범위	±0.03	Hz
계통정수	6613.2	MW/Hz
주파수 간격	2	초
속도조정률	0.32	%
효율	90	%

3.2 사례연구 결과분석 및 검토

ESS의 운전수리모델의 결과로 운전비와 한계운전비가 도출되며 ESS용량은 0MW부터 100MW씩 늘려가며 수행하였다. ESS 용량이 증가함에 따라 각 발전소군별 연간발전량의 변화는 그림 4, 5, 6, 7, 8과 같이 나타났다. 원자력발전소군은 기저발전소군이기에 때문에 주파수조정용 ESS의 용량에 따라 연간발전량의 변화가 없음을 그림 4와 같이 알 수 있다. 기존의 주파수조정 예비력을 담당하던 유연탄발전소군은 ESS설비가 대체하면서 발전량이 그림 5와 같이 증가하였고 이에 해당하는 발전량만큼 LNG발전소군과 유류발전소군의 연간발전량은 그림 7, 8과 같이 감소하였다. ESS 용량에 따른 각 발전소군의 연간 운전비는 연간발전량과 같은 형태로 그림 9, 10, 11, 12, 13과 같이 결과가 도출되었다.

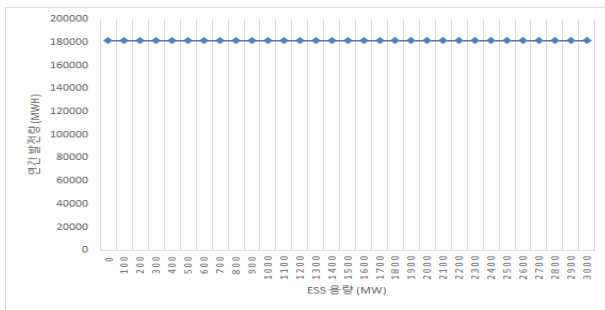


그림 4 ESS 용량별 원자력발전소 연간발전량  
Fig. 4 Annual generation nuclear power plants to ESS Capacity

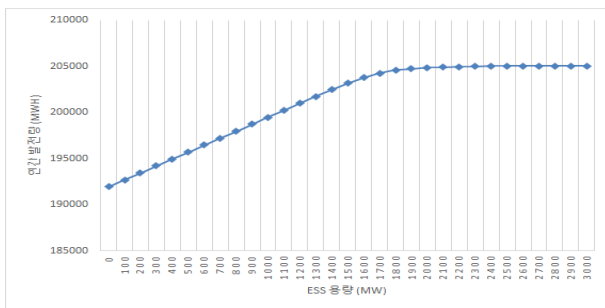


그림 5 ESS 용량별 유연탄발전소 연간발전량  
Fig. 5 Annual generation soft coal lignite power plants to ESS Capacity

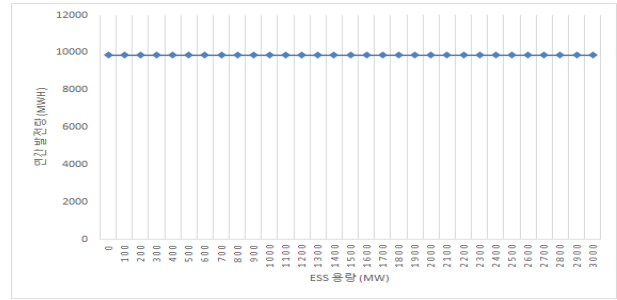


그림 6 ESS 용량별 무연탄발전소 연간발전량  
Fig. 6 Annual generation hard coal lignite power plants to ESS Capacity

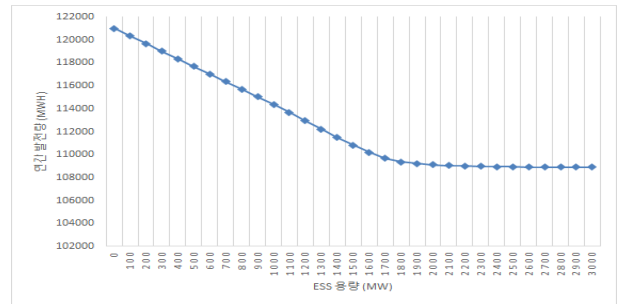


그림 7 ESS 용량별 LNG발전소 연간발전량  
Fig. 7 Annual generation LNG power plants to ESS Capacity

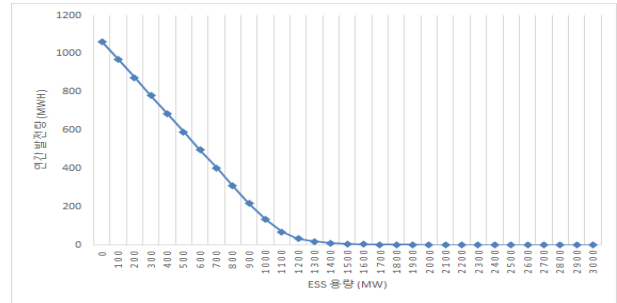


그림 8 ESS 용량별 유류발전소 연간발전량  
Fig. 8 Annual generation oil power plants to ESS Capacity

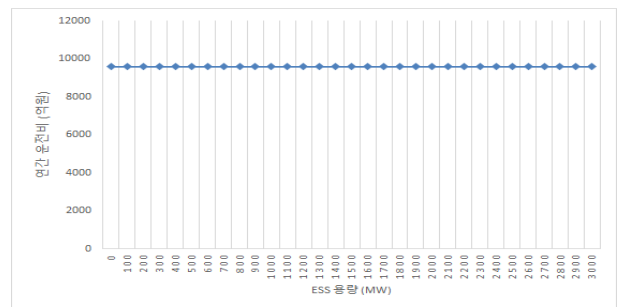
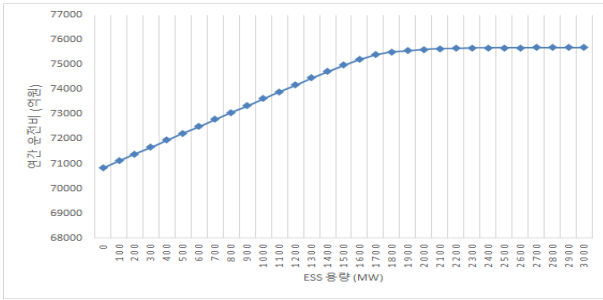
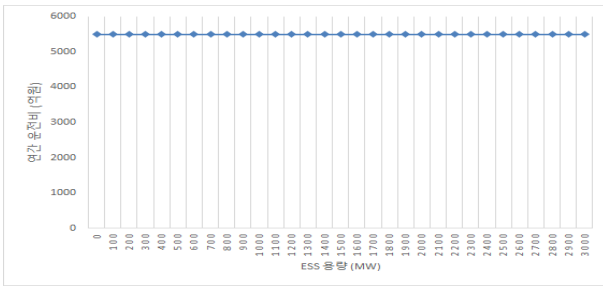


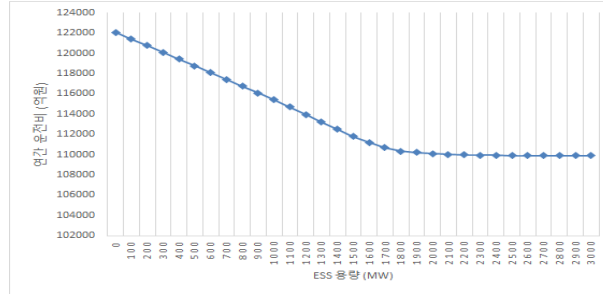
그림 9 ESS 용량별 원자력발전소 연간운전비  
Fig. 9 Annual operating cost nuclear power plants to ESS Capacity



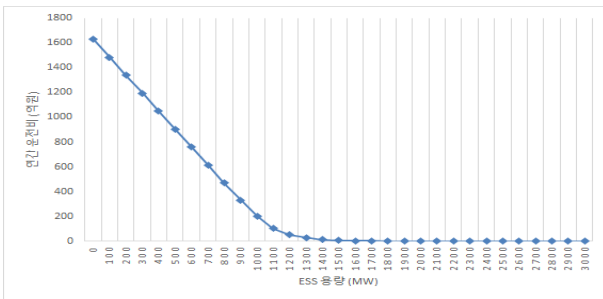
**그림 10** ESS 용량별 유연탄발전소 운전비  
**Fig. 10** Annual operating cost soft coal lignite power plants to ESS Capacity



**그림 11** ESS 용량별 무연탄발전소 운전비  
**Fig. 11** Annual operating cost hard coal lignite power plants to ESS Capacity

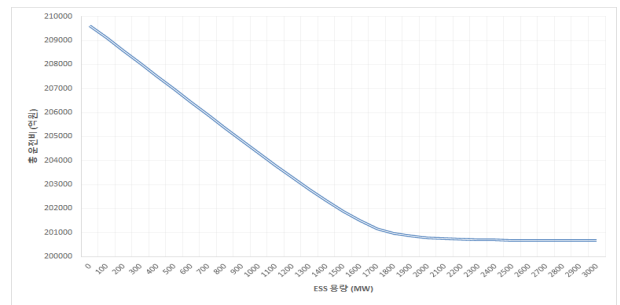


**그림 12** ESS 용량별 LNG발전소 운전비  
**Fig. 12** Annual operating cost LNG power plants to ESS Capacity

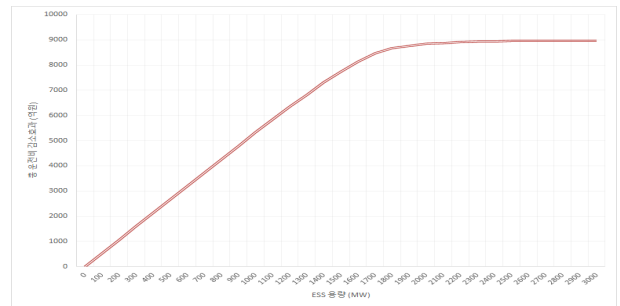


**그림 13** ESS 용량별 유류발전소 운전비  
**Fig. 13** Annual operating cost oil power plants to ESS Capacity

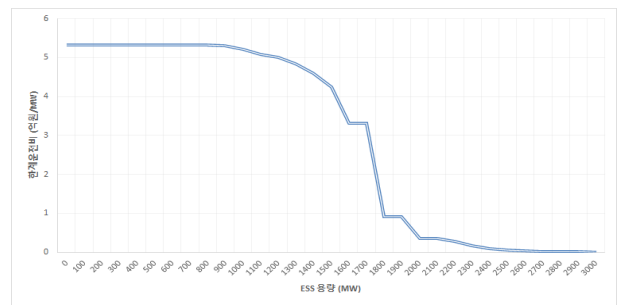
각 발전소군의 연간운전비를 모두 합한 총 운전비는 ESS 용량이 증가함에 따라 그림 14와 같이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 주파수조정용 ESS는 주파수조정용 예비력을 대체하기 때문에 그림 15와 같이 1500MW 이상이 되면 운전비 감소효과가 줄어들기 시작하여 2000MW부터는 ESS용량을 증가시켜도 총운전비 감소효과가 거의 발생하지 않았다. 그림 16은 ESS 용량별 한계운전비를 나타내는 그림으로 ESS 용량이 증가함에 따라 감소하고 있다. 이는 ESS 설비를 2000MW 이상으로 도입할 경우에는 더 이상 운전비 감소효과가 없기 때문에 국가적 낭비가 될 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서 다루지 않은 투자비까지 함께 고려한다면 총비용이 최소화되는 경제적인 ESS 용량을 산정할 수 있다.



**그림 14** ESS 용량별 총운전비 곡선  
**Fig. 14** Total Operation Cost according to ESS Capacity



**그림 15** ESS 용량별 총 운전비 감소효과  
**Fig. 15** Total Operation Cost according to ESS Capacity



**그림 16** ESS 용량별 한계운전비  
**Fig. 16** Operation Marginal Cost according to ESS Capacity



#### 4. 결 론

본 논문에서는 국가적 관점에서 용도별 ESS 적정용량을 산정하기 위해 우선적으로 용도별 ESS 운전수리모형을 수립하였다. 이때 용도별 ESS 운전수리모형은 기존의 국가전원계획모형에 계절별로 ESS 설비를 설치할 수 있도록 개선하였고 운전비는 연료비 이외에 무부하비와 기동·정지비로 고려하였다. 운전비 중 무부하비와 기동·정지비는 발전소 출력과 관계없는 비용이기 때문에 정수형 변수를 계단함수로 표현하였다. 또한 기존의 운전수리모형은 1년 단위이지만 계절에 따라 ESS 운전 효과가 다르기 때문에 계절단위로 재구성하여 새로운 운전수리모형을 수립하였다.

사례연구는 주파수조정용 ESS를 대상으로 수행하였다. 주파수 분포표를 사용하여 불규칙적인 주파수 변동을 2초단위로 모의하여 사용하였고 ESS와 발전소간 송전손실이 없다고 가정하였다. 또한 각 발전소군의 출력은 우선순위법에 의해 결정하였다. 사례연구결과 총 운전비는 ESS용량에 따라 감소하다가 2,000MW 부근에서 200,666억 원에서 변화되지 않았고 한계운전비는 1,000MW를 기점으로 급격히 줄어들어 2,400MW부터 0원에 가깝게 수렴하였다. 따라서 ESS 용량이 커질수록 운전비 감소효과는 0에 가까워지는 것을 알 수 있었다.

추후 연구에서는 국가적 관점에서 ESS 보급 촉진을 위한 지원금을 언제까지 얼마나 책정해야 하는지에 대한 연구와 ESS 설치 장소에 대한 연구가 필요하다. 또한 ESS의 운전이 단일용도가 아닌 2개 이상의 용도가 통합된 융합형으로 발전할 가능성이 높기 때문에 이에 대한 적정 ESS 용량산정 연구가 요청된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2014년도 한국전력공사 전력산업 기초연구과제(NO. R14XA02-44)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

#### References

- [1] U.S. Department of Energy, "DOE Global Energy Storage Database", 2016.03
- [2] R & D Information Center, "Energy foster new industry policy / PV Applications and Technology Development Trends and Market Analysis", Knowledge Industry Information Institute, 2015.07
- [3] New Growth Engine Industry Information Technology Research, "Domestic and Foreign Energy Storage System (ESS) Industry Status and Business Strategy", Industrial Economy Research, 2014.01
- [4] Korea Electric Power Corporation, "ESS Project Plan of KEPCO", 2015.04
- [5] Korea Power Exchange, www.kpx.or.kr, 2014.01
- [6] Electimes, http://www.electimes.com/, 2016.02
- [7] Korea Smart Grid Association, "2015 SG Supply Support Program (ESS Areas)", 2015.07
- [8] Daniel S. Kirschen, "Capacity Optimization of Renewable Energy Sources and Battery Storage in an Autonomous Telecommunication Facility", IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 5, NO. 4, 2014.10
- [9] Sung-Min Cho, "Optimal BESS Sizing for Customer using New Model Considering Efficiency and Life Cycle", Ph.D. Thesis, Soongsil University, 2012.06
- [10] Jung-Hooun Kim, Joo-Rak Kim, Seung-Chan Chang, Jae-Yoon Lim, "A Study on Optimal Size Evaluation Model for Large Seale SMES System", Journal of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 4, No .2, 1999
- [11] Jung-Hooun Kim, Seung-Ho Park, "Establishing investment models for the estimate of optimal capacity cogeneration systems", The proceedings of KIEE, Vol. 48, No. 3, 1999.03
- [12] Korea Power Exchange, "Electricity market operating rules", 2015.03
- [13] Young-Hoon Lee, "A Study on Effects of Energy Saving by Energy Storage System", Master's Thesis, Hanyang University, 2016.02
- [14] Geon-Pyo Lim, Hyun-Gyu Han, Byung-Hoon Chang, Seung-Kwon Yang, Yong-Beum Yoon, "Demonstration to Operate and Control Frequency Regulation of Power System by 4MW Energy Storage System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63P, No. 3, pp. 169~177, 2014
- [15] Jun-Young Choe, "Study on SOC Feedback Control of Energy Storage System for Output Stabilization of Wind Power Generation", Ph.D. Thesis, Myongji University, 2015.02
- [16] Leon Freris, David Infield, "Renewable Energy in Power System", WILEY, 2011
- [17] Korea Power Exchange, "A study of the demand and supply planning large-scale screen of renewable energy facilities", 2014.03
- [18] Korea Power Exchange, "7th Electricity Supply Plan", 2015.07
- [19] Korea Power Exchange, "Aggregate operating performance of the power system", 2015.09

### 기 호 일 랑

- $s$ : 계절(1,2,..., $N_s$ )
- $d$ : 일형(1,2,..., $N_d$ )
- $t$ : 시간(1,2,..., $N_t$ )
  
- $i$ : F/R용이 아닌 발전소군(1,2,..., $N_i$ )
- $j$ : F/R용 발전소군( $N_i+1$ ,..., $N_i+N_j$ )
- $m$ : ESS 군(1,2,..., $N_m$ )
- $\Delta T^t$ :  $t$ 시간대 시간간격
- $\Delta f$ : 주파수변동량
- $O.C_{f/r,ESS}^d$ : 주파수조정용 ESS도입시 연간 운전비
- $C_{fuel,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형 연료비
- $C_{fuel,i,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $i$ 발전군 연료비
- $C_{fuel,j,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $j$ 발전군 연료비
- $C_{no,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형 무부하비
- $C_{no,i,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $i$ 발전군 무부하비
- $C_{no,j,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $j$ 발전군 무부하비
- $C_{start,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형 기동정지비
- $C_{start,i,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $i$ 발전군 기동정지비
- $C_{start,j,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $j$ 발전군 기동정지비
- $P_{i,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대  $i$ 발전군 출력
- $P_{j,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대  $j$ 발전군 출력
- $P_{j,F/R,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대  $j$ 발전군 주파수조정을 위한 출력여유분
- $P_{F/R,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대 주파수조정을 위한 출력여유분
- $t_{up,i,k,f/r,ESS}^{sd}$ :  $s$ 계절  $d$ 일형  $i$ 발전군의 주파수조정용 ESS도입시  $k$ 번째 기동시간
- $t_{down,i,l,f/r,ESS}^{sd}$ :  $s$ 계절  $d$ 일형  $i$ 발전군의 주파수조정용 ESS도입시  $l$ 번째 정지시간
- $P_{n,f/r,ESS}$ : 주파수조정용 ESS정격 출력
- $P_{j,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대  $j$ 발전소군 출력
- $P_{j,F/R,f/r,ESS}^{sd}$ : 주파수조정용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대  $j$ 발전소군 출력
- $P_L^{sd}$ :  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대 부하
- $P_{i,min,ESS}^{sd}$ : ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $i$ 발전군 최소출력
- $P_{i,ESS}^{sd}$ : ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $i$ 발전군 출력
- $P_{i,max,ESS}^{sd}$ : ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $i$ 발전군 최대출력
- $P_{j,min,ESS}^{sd}$ : ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $j$ 발전군 최소출력
- $P_{j,ESS}^{sd}$ : ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $j$ 발전군 출력
- $P_{j,max,ESS}^{sd}$ : ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $j$ 발전군 최대출력
- $R_{F/R}$ : 주파수조정용 최소 확보 예비력
- $R_o^s$ :  $s$ 계절 최소 확보대기 대체 예비력
- $\Delta f^{sd}$ :  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대 주파수변동량
- $O.C_{RESS}$ : 신재생에너지용 ESS 운전에 따른 총 운전비
- $C_{fuel,RESS}^{sd}$ : 신재생에너지용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대의 연료비
- $C_{no,RESS}^{sd}$ : 신재생에너지용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대의 무부하운전비
- $C_{start,RESS}^{sd}$ : 신재생에너지용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대의 기동정지비비
- $P_{L,R}^{sd}$ :  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대 신재생출력만큼 삭감한 부하
- $P_{RE}^{sd}$ :  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대 신재생에너지 출력
- $\Delta P_{RE}^{sd}$ :  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대 신재생에너지 변동출력

- $P_{r,RE}^{sd}$ :  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대 신재생에너지 기준출력
- $P_{n,RESS}$ : 신재생에너지용 ESS 정격출력
- $P_{e,RE}$ : 신재생에너지 발전설비용량
- $O.C_{L/LESS}^d$ : 부하평준화용 ESS 운전에 따른 총 운전비
- $C_{fuel,L/LESS}^{sd}$ : 부하평준화용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대의 연료비
- $C_{no,L/LESS}^{sd}$ : 부하평준화용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대의 무부하운전비
- $C_{start,L/LESS}^{sd}$ : 부하평준화용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대의 기동정지비비
- $O.C_{L/LESS}$ : 부하평준화용 ESS 운전에 따른 총 운전비
- $C_{L/LESS}^{sd}$ : 부하평준화용 ESS도입시  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대의 운전비
- $P_{g,L/LESS}^{sd}$ : 부하평준화용 ESS도입시  $g$ 발전소군의  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대 출력
- $P_{c,L/LESS}^{sd}$ : 부하평준화용 ESS도입시 충전시간대  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대 충전전력
- $P_{d,L/LESS}^{sd}$ : 부하평준화용 ESS도입시 방전시간대  $s$ 계절  $d$ 일형  $t$ 시간대 방전전력
- $I_{ESS}$ : ESS도입시 투자비
- $\lambda$ : 한계 운전비
- $\mu$ : 한계 투자비

## 저 자 소 개



### 김 정 훈 (Jung-Hoon Kim)

1955년 9월 13일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1981년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수. 현재 대한전기학회 부회장 및 용어위원회 위원장.

Tel : 02-320-1621  
 Fax : 02-320-1193  
 E-mail : kimjh@hongik.ac.kr



### 윤 석 민 (Seok-Min Youn)

1988년 1월 17일생. 2014년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기·정보·제어공학과 석사과정.

Tel : 02-338-1621  
 Fax : 02-320-1193  
 E-mail : ysm515@hongik.ac.kr