

# 국가적 관점에서 각 용도별 ESS 적정용량 산정을 위한 투자수리모델 수립에 관한 연구

## Study on Establishing Investment Mathematical Models for Each Application ESS Optimal Capacity in Nationwide Perspective

김 정 훈\* · 윤 석 민\*  
(Jung-Hoon Kim · Seok-Min Youn)

**Abstract** - At present, electric power industry around the world are being gradually changed to a new paradigm, such as electrical energy storage system, the wireless power transmission. Demand for ESS, the core technology of the new paradigm, has been growing worldwide. However, it is essential to estimate the optimal capacity of ESS facilities for frequency regulation because the benefit would be saturated in accordance with the investment moment and the increase of total invested capacity of ESS facilities. Hence, in this paper, the annual optimal mathematical investment model is proposed to estimate the optimal capacity and to establish investment plan of ESS facility for frequency regulation. The optimal mathematical investment model is newly established for each season, because the construction period is short and the operation effect for the load by seasons is different unlike previous the mathematical investment model. Additionally, the marginal operating cost is found by new mathematical operation model considering no-load cost and start-up cost as step functions improving the previous mathematical operation model. ESS optimal capacity is established by use value in use iterative methods. In this case, ESS facilities cost is used in terms of the value of the beginning of the year.

**Key Words** : ESS (Energy storage system), Frequency regulation reserve, Mathematical operation model, Mathematical investment model, Marginal cost, Step function

### 1. 서 론

전 세계는 현재 전력 공급과 수요를 항상 일치시켜야 했던 기존의 교류 전력계통의 단점을 보완하기 위해 저장이 가능한 ESS(Energy Storage System) 기술에 관심이 집중되고 있다. 이러한 ESS는 저장능력과 빠른 속응성으로 인해 예비력 대체와 발전설비 회피가 가능하기 때문에 국가적 관점에서 주파수조정용, 신재생에너지용, 부하평준화용에 대한 도입이 요구되고 있다[1]. 하지만 ESS 도입으로 대체 가능한 발전설비의 단가는 1MW당 2~9억원 [2]에 비해 ESS 단가는 20억원(2013년 기준)으로 상대적으로 높았기 때문에 경제성이 없었지만 최근 3년간 60% 정도 감소하여 2016년 1월에는 평균 8억원 정도가 되었고 향후 5년간 41% 수준으로 하락한다고 전망 [3]되고 있기 때문에 보급이 확대 될 것이 확실시 된다.

전 세계적으로 ESS 설치장소는 2016년 3월 현재 총 840개소 이고 이 중 184개소가 주파수조정용 ESS, 401개소가 신재생에너지

이용 ESS, 211개소가 부하평준화용 ESS이며 총 용량이 2,293 MW이다[4]. 국내외 ESS는 도입 초기단계이기 때문에 국가적 관점에서 ESS 적정용량을 산정하여 설치되지 않고 기술 확보를 위해 보급을 장려하는 차원에서 국가정책에 의해 설치를 지원하고 있다. 따라서 국가적 관점에서 ESS 적정용량을 산정하지 않고 필요 이상이 도입되면 국가적 낭비이기 때문에 이에 대한 연구가 하루빨리 수행되어야 할 것이다.

이러한 국내외의 ESS 용량산정에 대한 기존의 대표연구로는 Daniel S. Kirschen 교수의 독립된 통신 시설을 대상으로 강한 최적화기법(Robust Optimization)을 사용한 연구[5]가 있다. 이 연구에서는 계통과 연계되지 않은 신재생에너지만을 대상으로 다른 발전설비의 투자비를 고려하지 않았고 또한 설비 수명은 ESS에만 적용하는 한계점이 있기 때문에 기존 발전설비 및 ESS 설비 투자비를 모두 고려해야 하는 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[6]. 이 연구에서는 적정용량 산정과정에서 개개의 수용가를 대상으로 설비 투자비를 ESS만 고려하였고 변수로는 ESS 정격출력과 용량만 적용하였기 때문에 국가적 관점으로 확대 적용하기 어렵다.

한편 국가적 관점에서 다른 전원에 대해 적정용량을 구한 연구는 국가전원계획모델에 SMES[7]와 열병합발전설비를 설계하는 연구[8]가 있다. 이 연구들에서는 국가전원계획모델에서 모든 비

† 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

용함수는 선형모델이기 때문에 이에 맞추기 위하여 설비 투자비를 선형화 하여 사용하고 있고 1년 단위의 투자가 일어난다고 가정하여 시도되었다. 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 위한 투자수리모델을 수립하는 것을 목적으로 한다. 이때 투자수리모델은 기존의 국가전원계획모델에 계절별로 ESS 설비를 설치할 수 있도록 반영하였고 ESS가 운전하는 대상기간만 고려하여 수립한다. 또한 ESS설비는 기존의 발전설비에 비해 설치기간이 짧고 계절에 따른 운전효과는 다르기 때문에 본 논문에서는 투자시점을 계절별로하고 투자비를 연초의 가치로 환산하여 수리모델에 적용하도록 한다. 사례연구는 3가지 용도의 ESS 중 주파수조정용 ESS를 대상으로 적정용량을 산정한다.

## 2. 용도별 ESS 운전수리모델

투자수리모델에 적용하는 운전수리모델은 많은 투자 상황이 있기 때문에 빠른 계산과 수렴을 위해 단순해야 한다. 따라서 식 (1)과 같이 운전비를 연료비, 무부하비, 기동·정지비로 고려하여 연료비는 선형화 하였고 무부하비와 기동정지비는 발전소 출력과 관계없는 비용이기 때문에 계단함수로 표현하였다. 제약조건은 용도별 ESS의 운전특성과 대체하는 예비력에 따라 총·방전 특성이 다르기 때문에 용도에 따라 다르게 적용하였다. 용도별 ESS의 운전수리모델은 기존의 연구[9], [10], [11]에서 이미 수립된 것을 적용한다.

$$\begin{aligned} \text{MIN} & \text{운전비} = \text{연료비} + \text{무부하비} + \text{기동정지비} & (1) \\ \text{S.T.} & \text{ 용도별 ESS 제약조건} \end{aligned}$$

## 3. 용도별 ESS 투자수리모델 수립 및 적정용량 결정

### 3.1 용도별 ESS 투자수리모델 수립

적정용량 산정을 위한 투자수리모델은 검토대상기간 동안만 ESS가 운전한다고 가정하였기 때문에 검토기간이 끝나는 시점에서 잔존가치를 회수하는 한계기간모델을 사용하였다. 이러한 한계기간모델에서 총비용은 운전비, 공급지장비, 투자비, 잔존가치로 구성되고 이중 운전비와 공급지장비는 2장 용도별 운전수리모델로부터 산출된다.

투자비는 공사시작 시 발생하지만 투자수리모델에서 사용하는 투자비는 공사완료시점에 발생하기 때문에 이를 단리법으로 가공하여 사용한다. 이러한 투자비의 투자시점은 기존 발전설비의 표준건설기간이 14~66개월[12]로 길기 때문에 1년 단위 투자되는 반면, ESS설비는 공사기간이 3개월 이내로 짧고 계절에 따라 ESS 설비의 운전에 따른 효과가 다르기 때문에 계절별로 투자하는 것이 경제적이다. 또한 검토기간 중 신설된 설비는 종료된 이

후에도 사용이 가능하기 때문에 그 가치를 비용으로 환산하여 차감해준다. 이러한 총비용 성분들은 비용이 발생하는 시점이 다르기 때문에 이를 맞추주기 위해 연초의 가치로 환산하여 용도별 ESS 적정용량을 산정하는 새로운 투자수리모델을 수립한다.

### 3.1.1 용도별 ESS 투자수리모델의 수식화

투자수리모델의 구성을 위해 먼저 총비용의 성분을 수식화해야 하는데 총비용에는 운전비, 공급지장비, 투자비 등의 비용항목들로 세분화 한다. 또한 설비를 사용하는 한정된 기간에 대해 고려하였기 때문에 총 비용에는 설비의 잔존가치가 포함된다. 또한 ESS설비는 계절별로 투자되기 때문에 기존의 발전소 투자수리모델에 적용하기 위하여 연간단위로 합산하여 식 (2)와 같이 총비용을 수식으로 표현하였다.

$$\begin{aligned} \text{총비용} & = \text{운전비} + \text{공급지장비} + \text{투자비} - \text{잔존가치} & (2) \\ & = \sum_{y=1}^{N_y} \sum_{s=1}^{N_s} \left[ \sum_{s=1}^{N_s} OC^{y,s}(X_i^{y,s}, U_i^{y,s}) + \sum_{i=1}^{N_i} I_i^{y,s}(U_i^{y,s}) - \sum_{i=1}^{N_i} S(U_i^{y,s}) \right] \end{aligned}$$

총비용이 최소가 될 때 ESS 용량을 산출하기 위하여 목적함수와 제약조건을 수립하여 식 (3), (4)와 같이 최적화 문제를 구성한다.

$$\text{MIN} \sum_{y=1}^{N_y} \sum_{s=1}^{N_s} \left[ \sum_{s=1}^{N_s} OC^{y,s}(X_i^{y,s}, U_i^{y,s}) + \sum_{i=1}^{N_i} I_i^{y,s}(U_i^{y,s}) - \sum_{i=1}^{N_i} S(U_i^{y,s}) \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{S.T.} \quad X_i^{(y+1)s} & = X_i^{y,s} + U_i^{y,s} & (4) \\ U_i^{y,s} & > 0 \end{aligned}$$

발전설비 및 ESS설비는 새롭게 투자된 용량이 누적되기 때문에 점화식으로 표현하였고 설비의 수명이 다하여도 검토대상기간 동안에는 재투자한다고 가정하였기 때문에 신규설비투자용량인  $U_i^{y,s}$ 는 항상 0보다 크다는 조건을 적용하여 식 (4)와 같이 나타내었다.

#### 3.1.1.1 운전비 및 공급지장비

식 (1)에 적용한 운전비는 연초에 투자가 일어나는 투자수리모델에 시점을 맞추주기 위해서 할인율을 단리로 적용한다고 가정하여 식 (5)와 구성한다.

$$OC^{y,s}(X_i^{y,s}, U_i^{y,s}) = \frac{OC^{y,s'}(X_i^{y,s}, U_i^{y,s})}{\left(1 + \frac{A^y}{12} \cdot D^{y,s}\right)} \quad (5)$$

#### 3.1.1.2 투자비

투자비는 초기에 ESS 설비를 설치하는데 드는 비용과 운전과 무관하게 발생하는 유지비, 인건비 등의 고정비로 세분화 된다. 발전설비 및 ESS 설비의 실제 투자비는 그림 1과 같이 공사시작 시점을 기준으로 발생하지만 투자수리모델에서 적용되는 투자비

는 설비가 준공된 시점을 기준으로 적용한다. 따라서 투자수리모델에 사용되는 투자비는 실제 투자비를 그림 1과 식 (6)에서와 같이 가공하여 사용한다.

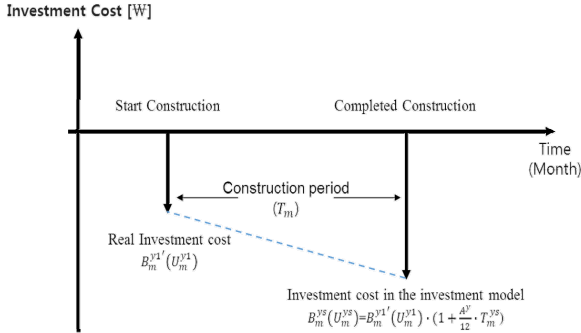


그림 1 실제 투자비와 투자모델에 사용하는 투자비  
 Fig. 1 Investment costs of using the actual and model

$$B_i^{ys}(U_i^{ys}) = B_i^{ys'}(U_i^{ys}) \cdot (1 + \frac{A^y}{12} \cdot T_i) \quad (6)$$

또한 기존의 발전설비의 투자시점은 연초이고 ESS설비의 투자시점은 계절 초이기 때문에 두 시점을 맞춰주어야 한다. 따라서 계절별 ESS설비 투자비를 각각 단리법으로 그림 2와 식 (7)에서와 같이 연초의 가치로 환산하였다.

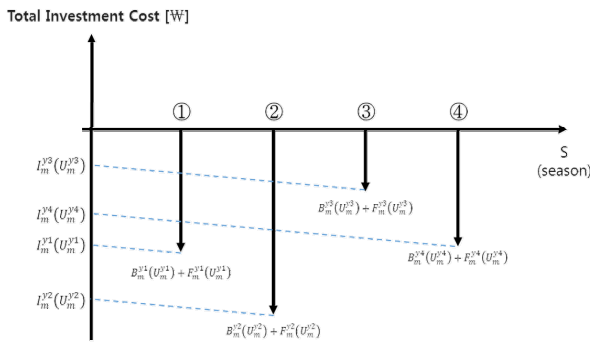


그림 2 연초가치로 환산한 계절별 ESS 투자비  
 Fig. 2 Seasonal investment when beginning of the year year

$$I_i^{ys}(U_i^{ys}) = \frac{B_i^{ys}(U_i^{ys}) + F_i^{ys}(U_i^{ys})}{(1 + \frac{A^y}{12} \cdot D^{ys})} \quad (7)$$

### 3.1.1.3 잔존가치

그림 3과 같이 검토대상기간 중 신설된 설비는 종료 이후에도 사용이 가능하기 때문에 감가상각을 하여 나머지 가치를 회수한다. 이를 잔존가치(Salvage Cost)라고 하며 식 (8)과 같이 나타내

었다.

$$S_i^{ys}(U_i^{ys}) = [1 - \frac{Y_i^{ys}}{L_i}] \cdot I_i^{ys}(U_i^{ys}) \quad (8)$$

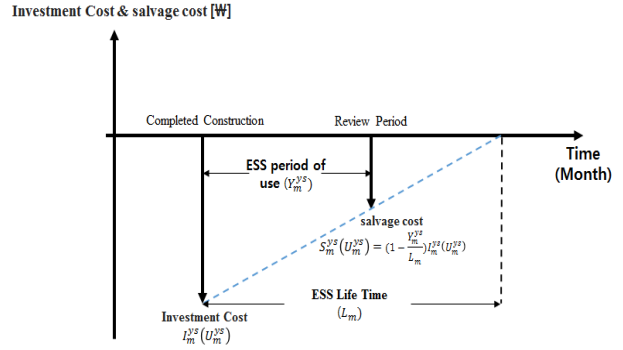


그림 3 연초가치로 환산한 잔존가치  
 Fig. 3 Salvage cost when beginning of the year

여기서 잔존가치는 수명이 다했을 때 가치를 0으로 하였고 감가상각은 선형이라고 가정하여 산정하였다.

### 3.1.2 최적조건

식 (5)에서 최적화 문제는 제약조건을 포함하므로 Lagrange 함수를 구성하여 Hamiltonian과 Kuhn-Tucker 정리를 이용하여 식 (9), (10)와 같이 최적조건을 구하였다.

$$\frac{\partial I_i^{ys}}{\partial U_i^{ys}} + \frac{\partial OC^{ys}}{\partial U_i^{ys}} - \Phi_i^{(y+1)s} - \frac{\partial S(U_i^{ys})}{\partial U_i^{ys}} = 0, \text{ (if } U_i^{ys} > 0) \quad (9)$$

$$U_i^{ys} = 0, \text{ (if } \frac{\partial I_i^{ys}}{\partial U_i^{ys}} + \frac{\partial OC^{ys}}{\partial U_i^{ys}} - \Phi_i^{(y+1)s} - \frac{\partial S(U_i^{ys})}{\partial U_i^{ys}} > 0) \quad (10)$$

### 3.2 적정용량 결정방법

ESS 투자용량을 최대경사법(steepest descent method)을 이용하여 반복적 방법으로 대입하여 사용가치(Use Value)를 분석하여 0이 되는 지점이 이상적인 적정용량이다. 하지만 사용가치가 정확히 0이 되는 지점을 찾기 어렵기 때문에 오차범위를 지정하여 오차가 범위 안에 있을 때 ESS 용량을 적정용량으로 산정한다. 이러한 과정을 다음과 같이 수식화하여 나타내었다.

#### 3.2.1 사용가치 분석

잔존가  $S(U_i^{ys})$ 는 투자비에 대한 잔존가치이기 때문에 식(9), (10)의  $\frac{\partial S(U_i^{ys})}{\partial U_i^{ys}}$ 를 수식으로 나타내면 식 (11)과 같이 나타낼 수

있다.

$$\frac{\partial S(U_i^{ys})}{\partial U_i^{ys}} = I_i^{ys'} = \left[1 - \frac{Y_i^{ys}}{L_i}\right] \frac{\partial I_i^{ys}}{\partial U_i^{ys}} \quad (11)$$

이때의 ESS의 투자여부는 한 단위 ESS 용량투자에 의한 비용, 잔존가치, 운전비 및 공급지장비의 감소효과를 고려한 사용가치에 의해 결정할 수 있고 이를 식 (12), (13), (14), (15)로 나타내었다.

$$UV_i^{ys} = \Phi_i^{ys} - \left(\frac{\partial I_i^{ys}}{\partial U_i^{ys}} - I_i^{ys'}\right) \quad (12)$$

$$UV_i^{ys} < 0: \text{비경제적, 투자하지 않음} \quad (13)$$

$$UV_i^{ys} = 0: \text{최적상태, 더이상투자하지 않음} \quad (14)$$

$$UV_i^{ys} > 0: \text{투자하면이득이 발생} \quad (15)$$

### 3.2.2 적정용량의 판정

ESS설비의 적정용량  $U_i^{ys}$ 를 결정하기 위한 최적화 기법으로 최대경사법을 사용하여 step의 크기를 식 (16)과 같이 정하였다.

$$\alpha = \theta \cdot K_i^{ys} \quad (16)$$

투자용량의 증감은 제약조건을 만족하면서 최대의 수익을 얻는데 있기 때문에 증감의 크기는 상대투자수익률  $[\Phi_i^{ys} - (I_i^{ys} - I_i^{ys'})] / (I_i^{ys} - I_i^{ys'})$ 에 비례한다. 따라서  $K_i^{ys}$ 는 식 (17)로 결정된다.

$$K_i^{ys} = \frac{1}{I_i^{ys} - I_i^{ys'}} \quad (17)$$

식 (18)과 같이 새로운 ESS투자용량을 개선하여 반복한다.

$$U_i^{ys(s+1)} = U_i^{ys} + \theta \cdot K_i^{ys} \cdot \Phi_i^{ys} - (I_i^{ys} - I_i^{ys'}) \quad (18)$$

최적조건이 만족되었는지 여부를 결정하는 수렴과정에 따라 ESS설비의 적정용량을 산정할 수 있는데 최적조건은 사용가치가 0일 때로 결정된다. 하지만 이점을 정확히 찾기 어렵기 때문에 식 (19)와 같이 오차를 정의 하여 이 값 이 오차범위 안에 있을 때 ESS 용량을 적정용량으로 판단하도록 한다.

$$error = \frac{\Phi_i^{ys} - (I_i^{ys} - I_i^{ys'})}{\Phi_i^{ys}} \quad (19)$$

이러한 용도별 ESS 적정용량 산정 계산과정을 그림 4와 같이 알고리즘으로 나타내었다.

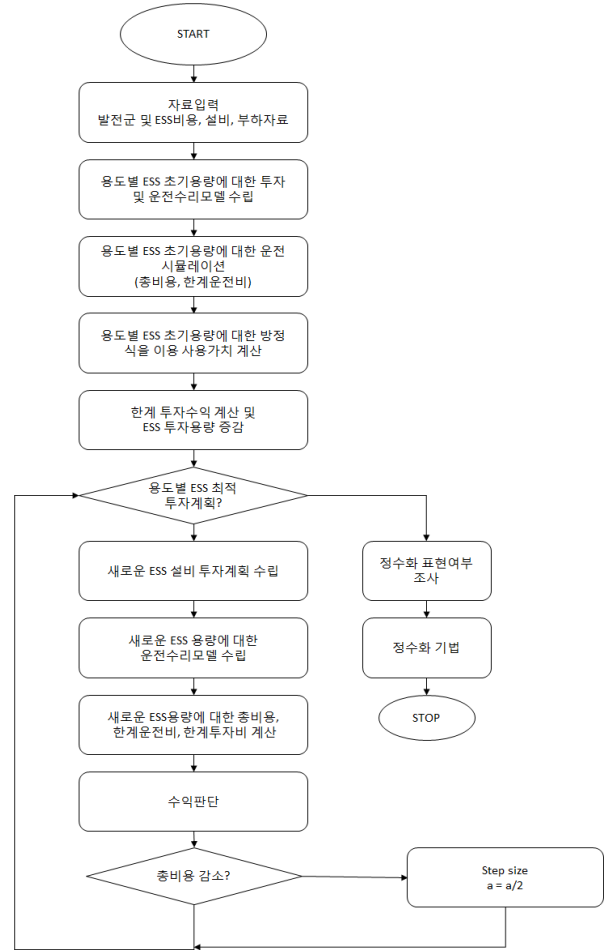


그림 4 용도별 ESS 적정용량산정 알고리즘

Fig. 4 The estimating algorithm of optimal investment plan

## 4. 사례 연구

### 4.1 사례연구방법

사례연구로는 주파수조정용 ESS를 표 1의 부하와 표 2의 발전소군이 있는 계통에 도입하였을 경우를 대상으로 수행하였다. 각 발전소군의 출력은 경제급전(우선순위법)에 의해서 결정하였고 표 3의 기타입력자료를 활용하였다. 부하는 표 1과 같이 1개의 일부하만 대표하여 사용하였고 송전손실이 없다고 가정하였다. 또한 다른 발전소군의 설비용량은 고정시키고 ESS설비용량만을 변수로 고려하였다. 주파수는 표 4의 평균과 표준편차를 매트랩의 난수발생 프로그램에 이용하여 2초단위로 발생시킨 불규칙적인 데이터를 사용하였다. ESS와 발전소군 간의 송전손실은 없고 ESS의 형식은 한 가지 형태만 설치되어있다고 가정하고 사례연구를 수행하였다.

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 기타 입력 자료

Table 3 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	%

표 4 주파수 분포 [13]

Table 4 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

## 4.2 결과분석 및 검토

### 4.2.1 운전수리모델 결과

ESS의 운전수리모델의 결과로는 운전비와 한계운전비가 도출되었다. ESS 용량이 0~3000MW로 변함에 따라 각 발전소군의 연간 운전비는 그림 5, 6, 7, 8, 9와 같은 결과가 나왔다. 기저발전을 담당하는 원자력발전소군은 출력변화가 없기 때문에 그림 5와 같이 ESS 용량에 관계없이 일정한 운전비가 도출되었다. 반면 유연탄발전소군은 ESS 용량이 증가함에 따라 담당하는 주파수조

정에비력의 크기가 줄어들기 때문에 더 많은 발전을 할 수 있다. 따라서 그림 8과 같이 발전량이 증가하기 때문에 운전비도 같이 증가하다가 포화됨을 알 수 있다. 또한 유연탄 발전소의 발전량이 많아짐에 따라 LNG발전소군과 유류발전소군의 발전량이 감소하여 그림 8, 9와 같이 운전비 또한 감소하였다.

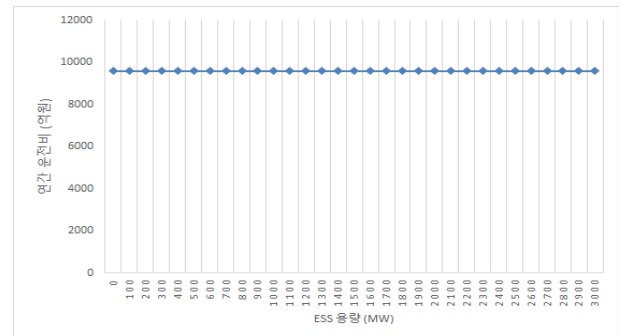


그림 5 ESS 용량별 원자력발전소 연간운전비

Fig. 5 Annual operating cost nuclear power plants to ESS Capacity

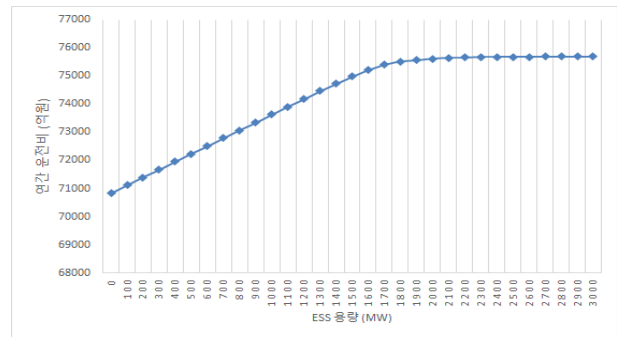


그림 6 ESS 용량별 유연탄발전소 운전비

Fig. 6 Annual operating cost soft coal lignite power plants to ESS Capacity

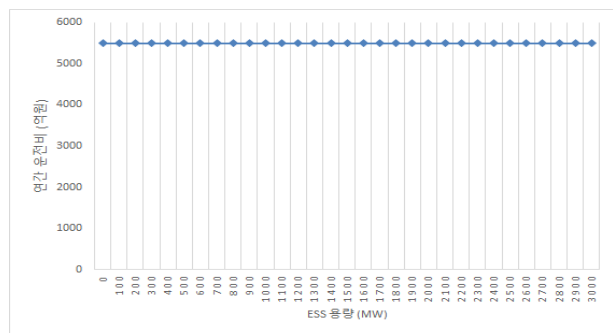


그림 7 ESS 용량별 무연탄발전소 운전비

Fig. 7 Annual operating cost hard coal lignite power plants to ESS Capacity

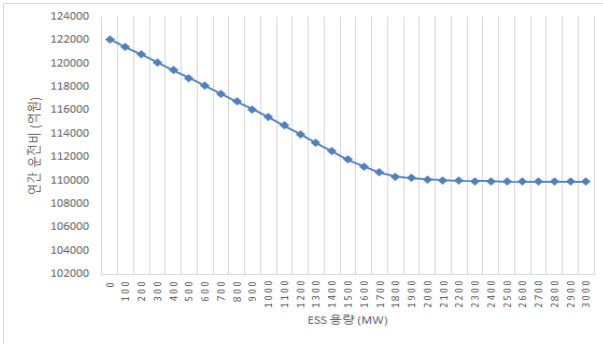


그림 8 ESS 용량별 LNG발전소 운전비  
Fig. 8 Annual operating cost LNG power plants to ESS Capacity

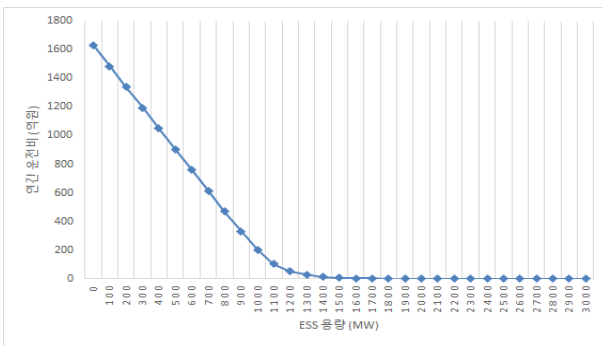


그림 9 ESS 용량별 유류발전소 운전비  
Fig. 9 Annual operating cost oil power plants to ESS Capacity

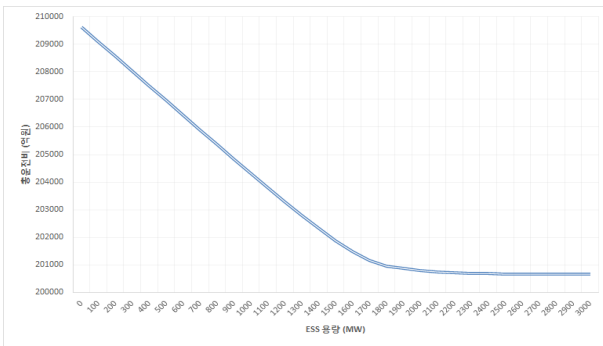


그림 10 ESS 용량에 따른 총운전비 곡선  
Fig. 10 Total Operation Cost according to ESS Capacity

각 발전소군의 운전비를 모두 합한 총 운전비는 그림 10과 같다. ESS 용량이 증가할수록 총운전비는 감소하다가 더 이상 발전 설비 대체효과가 없기 때문에 1800MW 부근부터 증가하지 않았다. 또한 그림 11과 같이 한계운전비도 1800MW 부근부터 급격히 감소하여 0에 수렴하는 것을 알 수 있다.

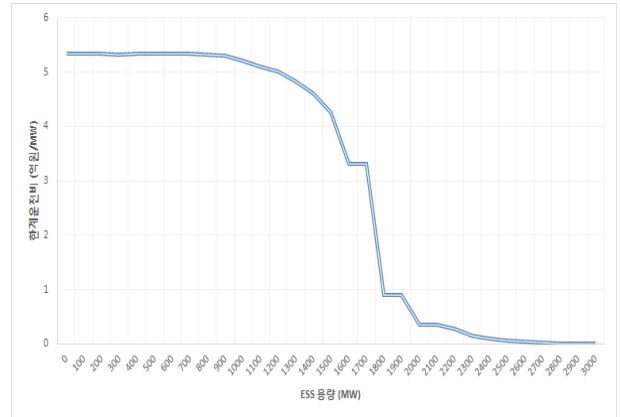


그림 11 ESS 용량별 운전한계비  
Fig. 11 Operation Marginal Cost according to ESS Capacity

#### 4.2.2 ESS 적정용량 산정 결과

ESS 운전수리모델과 투자수리모델에 의한 최적규모 산정결과는 1748MW이었으며, 이때의 반복횟수와 수렴오차는 표 5와 같은 결과가 도출되었다.

표 5 최적용량 산정시 반복횟수와 수렴오차

Table 5 Computational result of optimal capacity, iteration number

적정용량	반복횟수	수렴오차
1748MW	50회	0.008

그림 12에서는 ESS적정용량이 반복횟수가 증가함에 따라 적정용량에 근접할수록 점점 변화의 폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이때 그림 13과 같이 오차 또한 줄어들다가 50회에서 수렴오차인 0.008 이내가 되기 때문에 ESS 적정용량을 1748MW로 산정하였다.

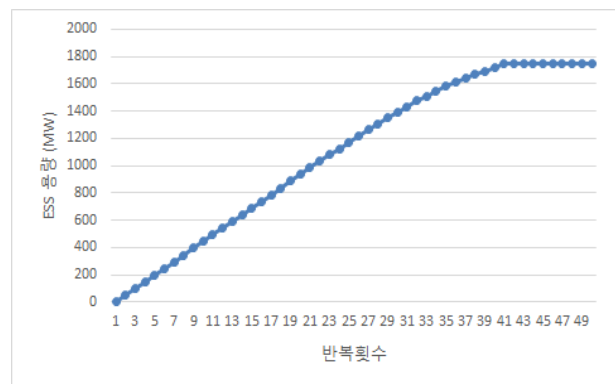


그림 12 ESS 적정용량 계산시 투자용량의 변화  
Fig. 12 Variation of invested ESS capacity

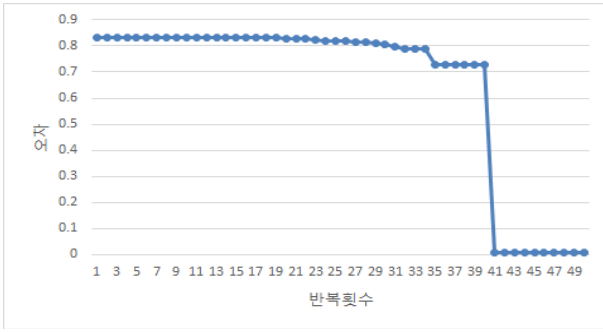


그림 13 ESS 적정용량 계산시 수렴오차  
Fig. 13 Error of invested ESS capacity

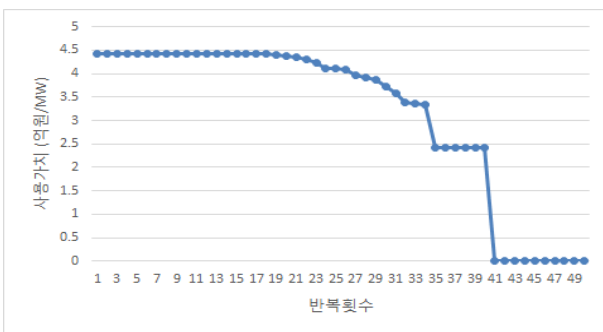


그림 14 ESS 적정용량 계산시 사용가치  
Fig. 14 Use Value of invested ESS capacity

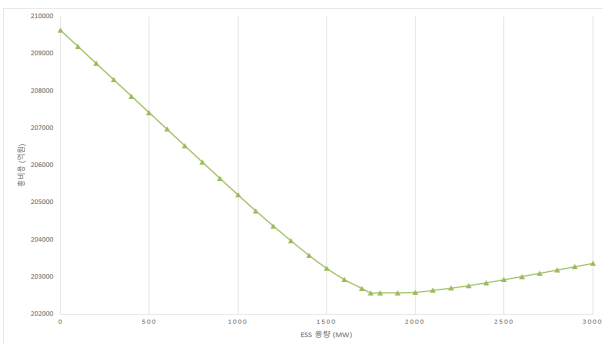


그림 15 ESS 용량에 따른 총비용 곡선  
Fig. 15 Total Cost according to ESS Capacity

ESS 적정용량에 가까워질수록 사용가치 또한 그림 14와 같이 0에 가깝게 수렴하였다. 오차가 수렴오차범위 이내가 되어 반복이 멈췄을 때의 사용가치는 7만원/MW로 ESS용량을 더 투자했을 때 순이익이 매우 작음을 알 수 있다. 총비용은 ESS 적정용량으로 산정된 1748MW까지는 운전비 감소효과가 ESS 설비비보다 크기 때문에 감소하다가 그 이후부터는 운전비 감소효과가 ESS 설비비보다 작기 때문에 그림 15와 같이 다시 총비용이 증가하였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 국가적 관점에서 용도별 ESS 적정용량을 산정하기 위해 기존의 국가전원계획모델 개선하여 ESS 설비를 추가하고 ESS가 운전하는 대상기간만 고려한 한계기간모델을 적용하여 투자수리모델을 수립하였다. 투자수리모델은 ESS 설비가 기존의 발전설비에 비해 설치기간이 짧아서 계절 초에 투자가 이루어지는 것이 경제적이기 때문에 기존의 발전설비와 함께 투자비를 적용하기 위하여 연초의 가치로 환산하였다. 또한 한계운전비와 한계투자비를 고려한 사용가치를 분석하여 반복적인 방법으로 계산하였고 오차범위를 지정하여 용도별 ESS 적정용량을 판정하는 알고리즘을 제안하였다.

사례연구는 주파수조정용 ESS를 대상으로 적정용량을 산정하였다. 주파수 분포표를 사용하여 불규칙적인 주파수 변동을 2초 단위로 모의하여 사용하였고 ESS와 발전소간 송전손실이 없다고 가정하였다. 또한 각 발전소군의 출력은 우선순위에 의해 결정하였다. 사례연구결과 반복횟수 50회만에 수렴오차 0.008 이내로 수렴하였고 이때 ESS 용량인 1748MW를 적정용량으로 판정하였다. 50회 이후부터는 ESS 용량이 거의 변화하지 않았고 사용가치 또한 6.76만원/MW로 ESS용량을 더 투자했을 때 편익이 거의 없는 것을 알 수 있다.

추후연구에서는 용도별이라는 개념에서 벗어나 보다 더 효율적인 사용을 위하여 여러 용도가 합쳐지는 융합형으로 발전될 가능성이 높기 때문에 이 모델에 대한 연구가 요청된다. 또한 본 연구의 응용분야로는 마이크로그리드의 적정용량 산정에도 적용이 가능하며 이에 관련한 연구에 이용이 가능할 것으로 예상된다.

## 감사의 글

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

## References

- [1] Korea Electric Power Corporation, "ESS Project Plan of KEPCO", 2015.04
- [2] Korea Power Exchange, "Power Plant Project Status (Fourth quarter of 2015)", 2016.03
- [3] GTM Research, "Grid-Scale Energy Storage Balance of Systems 2015-2020: Architectures, Costs and Players", 2016.01
- [4] U.S. Department of Energy, "DOE Global Energy Storage Database", 2016.03
- [5] 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, OCTOBER 2014

[6] Sung-Min Cho, "Optimal BESS Sizing for Customer using New Model Considering Efficiency and Life Cycle", Ph.D. Thesis, Soongsil University, 2012. 06

[7] 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

[8] 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

[9] Jung-Hoon Kim, Seok-Min Youn, You-Seok Lee, Woo-Jin Jung "probabilistic simulation of optimal ESS operation for optimal size evaluation of ESS installations for load leveling in the national perspective" proceedings of KIEE SmartGrid Society Autumn Conference, 2014.12

[10] Jung-Hoon Kim, Seok-Min Youn, "A study on the operation mathematical models for optimal size evaluation of ESS installations for frequency regulation in the national perspective", proceedings of KIEE Power Engineering Society Spring Conference, 2015.05

[11] Jung-Hoon Kim, Seok-Min Youn, You-Seok Lee, Hong-Kwan Lee, "A study on establishing operation mathematical model for optimum capacity estimation of the ESS facility for renewable energy in the national perspective", proceedings of KIEE Summer Conference, 2015.07

[12] Smart Grid Team of Korea Power Exchange, "A study of BESS Introduction plan for the Smart Grid activation and power supply stable", 2013.02

[13] Korea Power Exchange, "Aggregate operating performance of the power system", 2015.09

$OC^{us'}(X_i^{ys}, U_i^{ys})$ :  $y$ 년도  $s$ 계절의 운전비와 공급지장비  
 $OC^{us}(X_i^{ys}, U_i^{ys})$ : 연초가치로 환산한  $y$ 년도  $s$ 계절의 운전비와 공급지장비  
 $I_i^{ys}(U_i^{ys})$ : 연초가치로 환산한  $y$ 년도  $s$ 계절  $i$ type 설비의 총투자비  
 $B_i^{ys}(U_i^{ys})$ :  $y$ 년도  $s$ 계절  $i$ type 설비의 운전수리모델에서의 투자비  
 $B_i^{us'}(U_i^{ys})$ :  $y$ 년도  $s$ 계절  $i$ type 설비의 실제 투자비  
 $F_i^{ys}(U_i^{ys})$ :  $y$ 년도  $s$ 계절  $i$ type 설비의 고정비  
 $S(U_i^{ys})$ :  $y$ 년도  $s$ 계절  $i$ type 설비의 잔존가치  
 $Y_i^{ys}$ : 계획대상기간  
 $L_i$ :  $i$ type 설비의 수명  
 $UV_i^{ys}$ :  $y$ 년도  $s$ 계절  $i$ type 설비의 사용가치  
 $\frac{\partial I_i^{ys}}{\partial U_i^{ys}}$ :  $y$ 년도  $s$ 계절  $i$ type 설비의 한단위 투자에 의한 비용  
 $\Phi_i^{ys}$ : 운전비와 공급지장비의 감소효과  
 $I_i^{ys'}$ : 한단위투자의 잔존가치  
 $\theta$ : 무차원의  $stepsize$   
 $K_i^{ys}$ :  $y$ 년도  $s$ 계절  $i$ type 설비에 대한 변환인자

## 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

### 기 호 일 략

$y$ : 년도(1,2,..., $N_y$ )

$s$ : 계절(1,2,..., $S$ )

$i$ : ESS 및 발전설비  $i$ type(1,2,..., $N_i$ )

$U_i^{ys}$ :  $y$ 년도  $s$ 계절  $i$ type 설비의 투자용량

$X_i^{ys}$ :  $y$ 년도  $s$ 계절  $i$ type 설비의 설비용량

$A^y$ :  $y$ 년도 할인율

$D^{ys}$ :  $y$ 년도  $s$ 계절의 연초로부터의 기간

$T_i$ :  $i$ type 설비의 건설기간