

주파수조정용 ESS의 성능검증 및 경제성평가 알고리즘에 관한 연구

이주광, 최성식, 강민관, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학부

A Study on The Performance Verification and Economic Evaluation of ESS for Frequency Regulation Application

Ju-Gang Lee, Sung-Sik Choi, Min-Kwan Kang, Dae-Seok Rho*

Division of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약 최근 신재생에너지의 확대 보급과 더불어 전기저장장치(ESS, Energy Storage System)가 활발하게 도입되고 있다. 하지만 현재 전기저장장치에 대한 도입효과와 경제성 및 계통에 미치는 영향에 대한 구체적인 평가방법이 없어 효과적인 도입운용이 어려운 실정이다. 특히 주파수조정용 ESS에 대한 국제적인 기술표준 및 제도가 마련되지 않아, 이의 설치에 따른 전기품질, 계통영향, 기여도 등은 물론 편익 산정에 대한 종합적인 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 주파수조정용 ESS의 성능검증 방안을 마련하기 위하여, 기존발전기의 주파수조정 성능평가 방법인 미국 PJM의 AGC(Automatic Generation Control, 발전기 자동발전제어) 성능 평가방식을 분석하여, 주파수조정용 ESS의 성능평가 알고리즘을 제안하였고, 고가발전기의 정산금과 화력발전기의 정산금을 이용하여 500MW급의 주파수조정용 ESS의 도입에 따른 편익을 산정할 수 있는 경제성 평가 알고리즘을 제시하였다. 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 실 계통 데이터를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 전기저장장치가 기존의 발전기에 비하여 아주 우수한 성능을 가지고 있음을 확인하였고, 500MW 도입 시 연간 약 3,457-4,296억의 편익이 발생함을 확인하였다.

Abstract Recently, the installation of energy storage systems (ESSs) has increased in parallel with the extension of renewable energy resources. However, there has been no concrete analysis of the performance verification and economic evaluation of ESSs, which makes it difficult to perform an effective installation and operation of an ESS. In particular, there are no international technical standards and guidelines on electric ESS for frequency regulation applications. Therefore, a comprehensive study on the power quality, impact on grid, extent of contribution, and cost benefit study of ESS are strongly being required. Under these backgrounds, this paper proposes a performance verification algorithm on ESS for frequency regulation application based on an analysis of the AGC(Automatic Generation Control) performance verification method of PJM in USA. In addition, this paper proposes an economic evaluation algorithm on a 500 MW installation of ESS for frequency regulation applications using the account settlement of an expensive gas-fired generation plant and coal-fired power generation plant. From the simulation with real ESS operation data and 500 MW installation case, it was confirmed that the ESS shows superior performance to any other conventional generators and provides an annual benefit of 500 MW ESS are between 345~429 billion won.

Keywords : Automatic Generation Control, Energy Storage System, Economic Evaluation, Frequency Regulation, Governor Free Operation, Performance Verification

*Corresponding Author : DaeSeok Rho(Koreatech)

Tel: +82-41-560-1167 email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received February 3, 2017

Revised (1st April 10, 2017, 2nd May 1, 2017)

Accepted May 12, 2017

Published May 31, 2017

1. 서 론

최근 온실가스 감축을 통한 기후변화 대응 방안으로 에너지효율 향상, 수요반응, 신재생에너지의 보급, 전기자동차의 보급 등이 활발하게 추진되고 있으며, 온실가스 감축 효과를 배가시키기 위한 방안으로서 전기저장장치(ESS, Energy Storage System)의 활용가치가 새롭게 인식되고 있다[1-2]. 우리나라도 정부가 주도하여 중대형 ESS 기술개발 및 산업화 정책을 추진하고 있고(K-ESS 2020), 2020년까지 6.4조원 규모의 기술개발과 설비투자 및 ESS 설치의무화 방안을 검토하고 있다. 하지만, ESS의 사용목적에 따른 도입효과와 경제성 및 계통에 미치는 영향에 대한 구체적인 평가방법이 없어, 효과적인 도입운용이 어려운 실정이다. 특히 주파수조정용 ESS에 대한 국제적인 기술표준이 없어, 주파수조정(FR, Frequency Regulation)용 ESS 설치에 따른 전기품질, 계통영향, 기여도 등은 물론 편익 산정에 대한 종합적인 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 주파수조정용 ESS의 성능검증 방안을 마련하기 위하여, 기존발전기의 주파수조정 성능평가 방법을 바탕으로 주파수조정용 ESS의 성능평가 알고리즘을 제안하였다[3-6]. 또한, 전력회사에서 주파수조정용 ESS를 도입하는 경우의 경제성을 평가하기 위하여 미국의 실적기반 주파수조정 서비스 제도의 현황 및 효과를 분석하고[7-9], 고가발전기의 정산금과 화력발전기의 정산금을 이용하여 주파수조정용 ESS의 도입에 따른 편익을 산정하는 경제성 분석 알고리즘을 제시하였다.

2. FR용 ESS의 성능검증 알고리즘

2.1 기존 발전기의 AGC 성능검증 알고리즘

KPX는 전력시장운영규칙에 따라 계통에 병입되어 운전 중인 발전기를 대상으로 불시에 발전기의 AGC 응답특성을 평가하고 있다. 또한, 발전기들의 출력 증감발률이 기준값 대비 80% 이상 유지하는 발전기들에 한해서 발전회사가 제공한 계통운영보조서비스(AGC)에 대해 제어가능용량(AGCQ), 제어 가용률(CAWF) 및 제어성과(CPFW)에 따른 가중치를 고려하여 이를 정산하고 있다. 여기서, AGC의 정산요금은 표 1과 같이 제어성과 가중치를 통해 AGC의 이행성과에 따라 이를 보상하고 있다.

Table 1. Weighting factor of AGC control performance

CPF	under 0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~0.95	excess 0.95
CPWF	0.8	0.85	0.9	0.95	1	1.05	1.1

한편, 제어성과 값(CPF)은 식 (1)과 같이 발전기의 실제출력에 대한 1분 평균값과 계획출력의 1분 평균값의 상관관계를 통해 얻게 된다. 이때, 계획출력 값은 EMS에서 송출된 AGC target 값이다. 그러나 발전기의 실제출력 값은 AGC 응답량과 조속기 응답량이 함께 포함되어 있어 이를 구별하기가 어렵다. 이를 위해 KPX는 조속기 응답량을 추정하기 위하여 식 (2)를 통해 조속기 응답량을 산정한다[10].

$$CPF = Correl_{day}(\overline{\text{실제출력}_m}, \overline{\text{계획출력}_m}) \quad (1)$$

$$\text{조속기응답량} = \frac{\text{발전기정격출력} \times \text{주파수편차}}{60 \times \text{속도조정률}} \times 100 \quad (2)$$

2.2 PJM의 AGC 성능검증 알고리즘

미국의 PJM Manual에서는 AGC의 성능을 평가하기 위하여, 제어신호와 계량치에 대한 이력자료를 기준으로 복합 성능점수를 계산하여 성능을 평가하고 있다. 즉, 정확도 점수($Score_A$), 시지연 점수($Score_D$), 정밀도 점수($Score_P$)에 각각 0과 1사이의 값을 가지며 세 값의 합이 1이 되는 가중치 A, B, C를 곱하여, 식(3)과 같이 성능을 평가한다.

$$Composite\ Score = A(Score_A) + B(Score_D) + C(Score_P) \quad (3)$$

여기서, $Score_A$: 정확도 점수, $Score_D$: 시지연 점수, $Score_P$: 정밀도 점수, A, B, C : 가중치

2.3 FR용 ESS의 성능검증 알고리즘

앞에서 분석한 미국전력회사(PJM)의 AGC 성능평가 방법을 바탕으로, 본 논문에서는 주파수조정용 ESS의 성능을 평가하는 절차를 다음과 같이 4단계로 나누어 제안하였다[11-12].

[STEP 1] 정확성 점수를 구하기 위하여, 5분 동안의 제어신호(10초 간격)와 5분간의 ESS의 출력 데이터를 기준으로 제어명령과 ESS 출력치 사이의 통계적 상관관계를 식(4)와 식(5)를 이용하여 산출한다. 이때 ESS의 출력치는 0~300초까지 10초씩 증가시킨다. 여기서, 상관관계의 정도를 +1의 경우에는 완전한 양의 상관관계가 있는 것이며, -1일 때는 완전한 음의 상관관계 그리고 0일 때는 서로 관계가 없다는 것을 의미한다.

$$correlation = \frac{\sum (Reg - \overline{Reg})(Res - \overline{Res})}{\sqrt{\sum (Reg - \overline{Reg})^2} \times \sqrt{\sum (Res - \overline{Res})^2}} \quad (4)$$

$$correlation = \int \frac{A(t)B(t-\delta)dt}{A(t)A(t)dt} \quad (5)$$

여기서, *correl*: 상관 계수, R_{eg} : ESS 제어 명령, $\overline{R_{eg}}$: ESS 제어 명령의 평균값, R_{es} : 10초 증분치를 고려한 ESS 출력치, $\overline{R_{es}}$: 10초 증분치를 고려한 5분간의 ESS 출력치 평균값

[STEP 2] 시지연 점수는 제어신호와 ESS 출력간의 통계적 상관관계 값을 가지는 지연시간에 대하여 식 (6)과 같이 구할 수 있다. 단 제어명령신호로부터 10초 간격으로 구해지는 상관관계 중 최대값에 의하여 발생되며, 1시간 동안에 대하여 시지연 점수를 평균하여 구한다.

$$Delay\ Score = (5min - \{[Time\ Delay] - 10s\}) / 5Min \quad (6)$$

[STEP 3] 정밀도 점수는 제어신호가 발생된 시간부터 ESS의 출력이 발생된 시간사이에서의 오차에 의하여 식 (7)과 같이 계산할 수 있으며, 이를 바탕으로 오차에 절대값을 적용하여 전체시간에 대한 평균으로 식 (8)과 같이 정밀도 점수를 산출한다.

$$Error[t] = (Response[t] - Signal[t]) / AREG \quad (7)$$

$$Precision\ Score = 1 - Avg(Abs(Error[t])) \quad (8)$$

[STEP 4] STEP 1~3에서 산출한 정확성 점수, 시지연

점수 그리고 정밀도 점수에 가중치 A, B, C를 적용하여 주파수조정용 ESS에 대한 성능을 종합적으로 평가한다.

상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 Fig. 1과 같다.

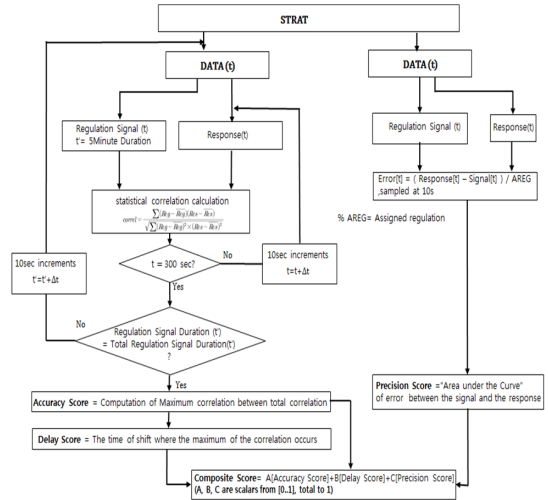
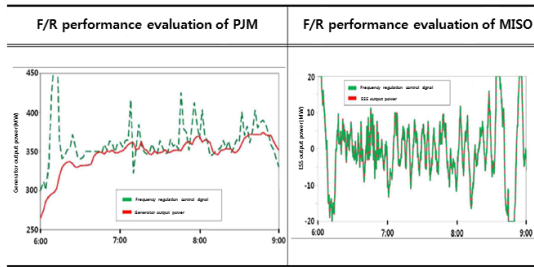


Fig. 1. Performance verification algorithm of ESS for frequency regulation

3. 경제성평가 알고리즘

3.1 경제성평가 개요

지금까지 주파수조정 목적으로 ESS를 도입 적용한 사례가 없고, 도입되는 ESS의 도입용량 및 방전 지속시간의 제약으로 인하여 기존의 발전기와 동일한 정산방법을 적용하는 경제성 평가 방법은 한계성을 가지고 있다고 할 수 있다. 한편, PJM의 주파수조정용 발전기 출력에 대한 응답실적과 MISO의 ESS 출력에 대한 응답실적을 비교해 보면 ESS가 급변하는 제어 신호에 대해서도 실속한 출력조정이 가능하여, Fig. 2와 같이 자동발전제어신호에 대한 등동 특성이 우수함을 알 수 있다. 이에 따라 미국은 증감발 능력이 우수하여 주파수조정 서비스 공급에 효과적인 ESS를 전력품질 향상에 적극 활용하기 위해 주파수 조정을 반영한 차등 정산 제도를 도입하여 운영하고 있다. 이와 같이 실적기반 F/R제도를 도입의 결과, ESS의 수익성이 개선되어(PJM의 경우 F/R 정산가격이 실적정산 시행 전 대비 최대 3배정도 상승), 수십 MW급의 대규모 ESS가 활발하게 도입되고 있다.



* Source : S. Eichorn, Performance Based Regulation (PBR) Phase 1, PJM, June 2012.

Fig. 2. Dynamic characteristics of generator and ESS

3.2 제안한 경제성 평가 알고리즘

주파수조정 목적의 ESS는 도입용량과 발전지속시간의 제약으로 인하여 발전기와 동일한 방식으로 편익을 계산하는 경제성 평가 방법은 한계성을 가지고 있다. 따라서 ESS가 도입되어 변동비가 가장 적은 석탄화력(유연탄)발전기의 주파수 조정예비력을 ESS가 대체할 경우, 석탄 화력발전기의 운전은 95%에서 100%로 증가하고, 이로 인해 고가 발전기의 운전이 감소하게 된다. 따라서 본 논문에서는 ESS가 석탄화력발전기를 대체함에 따른 편익과 AS(보조서비스) 정산에 따른 편익을 고려한 경제성 평가 알고리즘을 제안한다[13]. 석탄 화력대체 편익은, ESS가 어떤 발전기의 운전을 감소시켰는지 알 수 없으므로, SMP 정산금과 LNG발전기의 정산금을 적용하여 석탄 화력발전기의 정산금 차익을 산정한다. 즉, 식 (9)와 식 (10)과 같이 각 발전기의 정산금 차익과 ESS용량 그리고 운전시간의 곱으로 편익을 산정할 수 있다.

$$\text{석탄화력대체편익금} = (\text{SMP 정산금} - \text{유연탄정산금}) \times \text{ESS용량} \times \text{운전시간} \quad (9)$$

$$\text{석탄화력대체편익금} = (\text{LNG 정산금} - \text{유연탄정산금}) \times \text{ESS용량} \times \text{운전시간} \quad (10)$$

또한, AS(보조서비스) 정산에 따른 편익은 GFR 정산편익과 AGC 정산편익으로 나눌 수 있다. GFR 및 AGC 서비스 산정식은 각각 식 (11) 및 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{GFPI}_{i,t} = \text{GFRQ}_{i,t} \times \text{SDWFi} \times \text{DBWFi} \times \text{GFSFi}_{i,t} \times \text{GFHF} \times \text{운전시간(분)}/60 \quad (11)$$

여기서, $\text{GFP}_{i,t}$: 주파수추중서비스 정산금액, $\text{GFRQ}_{i,t}$: 주파수추중서비스 응답가능용량, SDWFi : 속도조절에 따른 가중치, DBWFi : 부동대에 따른 가중치, $\text{GFSFi}_{i,t}$: 주파수추중서비스 운전상태, GFHF : 주파수추중서비스 정산단가

$$\text{AGCP}_{i,t} = \text{AGCQ}_{i,t} \times \text{CAWFi}_{i,t} \times \text{CPWFi} \times \text{AGCF} \quad (12)$$

여기서, $\text{AGCP}_{i,t}$: 자동발전제어서비스 정산금액, $\text{AGCQ}_{i,t}$: 자동발전제어서비스 제어가능용량, $\text{CAWFi}_{i,t}$: 제어가능률에 따른 가중치, CPWFi : 제어성과에 따른 가중치, AGCF : 자동발전제어서비스 정산단가

4. 시뮬레이션 결과 및 특성분석

4.1 성능검증 특성분석

2.2에서 제안한 주파수조정용 ESS의 성능평가 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 실 계통 데이터를 바탕으로 성능 평가를 수행하였다. 사용한 24시간 동안의 제어신호와 출력치(동일 시간대별 값)에 대한 측정 데이터는 Fig. 3과 같다.

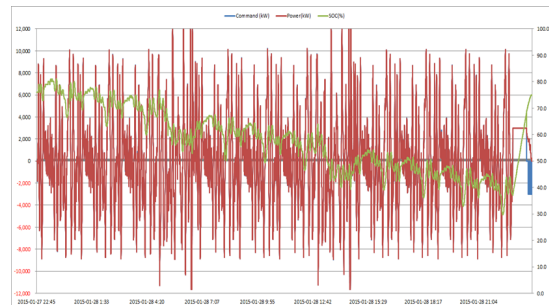


Fig. 3. Frequency regulation characteristics of ESS

상기의 데이터를 바탕으로 ESS의 AGC 성능을 산출한 결과, Table 2와 같이 정확성 점수(상관관계 점수)는 약 0.99, 시지연 점수는 ESS가 200msec 이내에 반응하여 1에 가깝고, 정밀도 점수는 0.9 정도로 산출되어 종합 성능점수가 전 시간대에 걸쳐 0.97 이상으로 산출되었다. 따라서 기존의 발전기(0.25이상이면 정산가능)에 비하여 ESS가 아주 우수한 AGC성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

Table 2. Performance score of ESS for frequency regulation

Time	Accuracy	Delay	Precision	Composite
18:00	0.999998	1	0.906589	0.968862
19:00	0.999998	1	0.929847	0.976615
20:00	0.999997	1	0.906618	0.968872
21:00	0.999998	1	0.928369	0.976122
22:00	0.999997	1	0.906330	0.976122
23:00	0.999998	1	0.929442	0.968776
24:00	1.000000	1	0.926378	0.976480
1:00	0.999997	1	0.925231	0.975458
2:00	0.999997	1	0.906126	0.976616
3:00	0.999998	1	0.927162	0.973112
4:00	0.999997	1	0.909206	0.972408
5:00	0.999998	1	0.926948	0.972994
6:00	0.999997	1	0.909060	0.970239
7:00	0.999998	1	0.928041	0.974087
8:00	0.999998	1	0.926177	0.975391
9:00	0.999997	1	0.923485	0.972052
10:00	0.999997	1	0.9113946	0.972009
11:00	0.999998	1	0.924897	0.971427
12:00	0.999997	1	0.913347	0.972647
13:00	0.999998	1	0.924830	0.970328
14:00	0.999997	1	0.913885	0.978539
15:00	0.999998	1	0.925187	0.975061
16:00	0.999997	1	0.913252	0.971083
17:00	0.999998	1	0.924648	0.974882

4.2 경제성평가 특성분석

본 논문에서 제안한 경제성 평가 방법을 이용하여 주파수조정용 ESS의 용량 500MW 도입에 따른 전력회사의 편익을 산정하였다. 석탄화력대체 편익을 계산하기 위해, SMP 정산금, 유연탄 정산금, LNG 정산금 자료는 전력거래소에서 제시한 2014년 전력시장 운영실적 자료를 활용하였다. 한편, ESS가 어떤 발전기의 운전을 감소시켰는지 알 수 없으므로, SMP 정산금과 LNG발전기의 정산금을 적용하여 각각의 석탄 화력발전기의 대체편익을 산정하였다. 먼저, SMP정산금을 기준으로 경제성을 분석한 결과는 Table. 3과 같이 약 3,370억원 가량의 편익이 발생함을 알 수 있었다.

한편, 고가의 LNG발전기의 운전을 감소시킨 경우에 대하여 경제성을 분석한 결과는 Table 4와 같이 약 4,209억원 가량의 편익이 발생함을 확인하였다. 또한, 보조서비스(AS) 정산에 따른 편익을 계산하기 위하여, GFR과 AGC의 참여비율을 실 계통의 운용실적을 고려하여 3:2의 비율로 가정하였다. GFR 서비스의 경우, 연

중 대부분 시간을 운전하고 있기 때문에 연중 모든 시간을 운전한 실적으로 가정하여 정산금을 산정하였다. 이에 대한 GFR의 연간 정산금을 분석한 결과는 Table 5와 같다.

Table 3. Analysis results of 500MW ESS(SMP)

Month	SMP Price (Won/kWh)	ESS Capacity (kW)	Day	Hour	Benefit(Won)
January	76.27	500,000	31	24	28,372,440,000
February	89.82	500,000	28	24	30,179,520,000
March	97.21	500,000	31	24	36,162,120,000
April	87.88	500,000	30	24	31,636,800,000
May	83.06	500,000	31	24	30,898,320,000
June	61.38	500,000	30	24	22,096,800,000
July	77.45	500,000	31	24	28,811,400,000
August	66.25	500,000	31	24	24,645,000,000
September	67.19	500,000	30	24	24,188,400,000
October	68.22	500,000	31	24	25,377,840,000
November	67.89	500,000	30	24	24,440,400,000
December	81.21	500,000	31	24	30,210,120,000
Total			365		337,019,160,000

Table 4. Analysis results of 500MW ESS(LNG)

Month	LNG Price (Won/kWh)	ESS Capacity (kW)	Day	Hour	Benefit (Won)
January	95.43	500,000	31	24	35,499,960,000
February	101.42	500,000	28	24	34,077,120,000
March	106.9	500,000	31	24	39,766,800,000
April	98.58	500,000	30	24	35,488,800,000
May	98.83	500,000	31	24	36,764,760,000
June	84.29	500,000	30	24	30,344,400,000
July	108.29	500,000	31	24	40,283,880,000
August	104.48	500,000	31	24	38,866,560,000
September	90.49	500,000	30	24	32,576,400,000
October	84.74	500,000	31	24	31,523,280,000
November	83.08	500,000	30	24	29,908,800,000
December	96.2	500,000	31	24	35,786,400,000
Total			365		420,887,160,000

Table 5. Analysis results of GFR service benefit

Location	GFR Price (Won/kWh)	ESS Capacity (kW)	Benefit(Won)
Korea	2.708	300,000	7,116,624,000
U.S	45		118,260,000,000

한편, AGC 서비스 정산의 경우에는 ESS 운전 실적에 따라 정산을 한다. 하지만 AGC의 경우, 운전실적에 대한 공개된 데이터가 없기 때문에, 1,500MW를 기준으로 한 AS(보조서비스) 정산결과의 비율(GFR 정산금 51%, AGC 정산금 9.6%)을 적용하여 편익분석을 실시하였고, 그 결과는 Table 6과 같다. 여기서는 2014년 계통운영 보조서비스 단가를 기준으로 GFR 정산금 2.708 원/kWh, AGC 정산금 0.896원/kWh를 적용하였다. 하지만 현재 미국에서는 우리나라의 10배 수준인 45원/kWh의 정산금으로 GFR 및 AGC 정산이 이루어지고 있어 이를 기준으로 한 분석도 함께 실시하였다.

Table 6. Analysis results of AGC service benefit

Location	AGC Price(Won)	ESS Capacity (kW)	Benefit(Won)
Korea	0.896	200,000	1,569,792,000
U.S	45	200,000	22,260,705,882

상기와 같이, 주파수조정용 ESS의 석탄 화력 대체효과와 AS 정산금에 대한 편익을 분석하면 Table 7과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 500MW에 대하여 AS 정산금(국내 정산금 기준 약 87억원, 미국 정산금 기준 약 1,400억원)을 포함하여, 연간 약 3,457억(SMP기준)~4,296억(LNG대체효과) 정도의 편익이 발생함을 확인하였다.

Table 7. Analysis results of total economic benefit

Category	ESS Capacity (kW)	Annual benefit (Won)	AS Price (Won)	Total benefit
SMP-Bituminous Price	500,000	337,019,160,000	8,686,416,000	345,705,576,000
LNG-Bituminous Price	500,000	420,887,160,000		429,573,576,000
U.S	500,000		140,520,705,882	

5. 결 론

주파수조정용 ESS에 대한 국제적인 기술표준 및 제도가 아직 마련되어 있지 않아, 주파수조정용 ESS 설치에 따른 전기품질, 계통영향, 기여도 등은 물론 편익 산정에 대한 종합적인 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존 발전기의 주파수조정 성능평가 방법을 바탕으로 주파수조정용 ESS의 성능평가 알고리즘을 제

안하였고, 화력발전기의 정산금을 이용하여 주파수조정용 ESS의 도입에 따른 편익을 산정하는 경제성 분석 알고리즘을 제시하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) ESS의 실 계통 데이터를 바탕으로 성능을 평가한 결과, ESS의 성능지수점수가 0.97정도로 산정되었다. 따라서 ESS는 전 시간대에 걸쳐 주파수조정 성능이 기존의 발전기에 비하여 아주 우수한 성능을 가지고 있음을 확인하였다.
- (2) 제안한 경제성 분석 알고리즘을 적용하여 500MW 용량의 주파수조정용 ESS의 도입에 따른 편익을 분석한 결과, SMP정산금을 기준으로 경제성을 분석한 결과는 약 3,370억원 가량의 편익이 발생하였고, 고가의 LNG발전기의 운전을 감소시킨 경우에는 약 4,209억원 가량의 편익이 발생함을 확인하였다.
- (3) 한편, AS 정산금에 대한 연간 편익 금은 국내 정산금 기준 약 87억원, 미국 정산금 기준 약 1,400억원의 편익이 산정되었다. 따라서 석탄화력발전 대체효과와 AS정산금 편익을 포함하여 연간 약 3,457억(SMP기준)~4,296억(LNG대체효과) 정도의 편익이 발생함을 확인하였다.

References

- [1] Eung-Sang Kim, "Energy storage system (ESS) and domestic and international ESS policy", Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation engineers, pp. 12-25, Nov. 2015.
- [2] EPRI, "Integrating Smart Distributed Energy Resources with Distribution Management Systems," EPRI, Sep. 2012.
- [3] Korea Power Exchange(KPX), Electricity Market Operation Council, [https://www.kpx.info/ eBiz/](https://www.kpx.info/eBiz/), 2016.
- [4] Korea Power Exchange(KPX), Ancillary Service(AS) Detailed Operation Council, 2016.
- [5] PJM Manual 12 Balancing Operations (2013, Revision 30).
- [6] PNNL-22010 ('2012, Protocol for Uniformly Measuring and Expressing the Performance of Energy Storage Systems).
- [7] KEPCO Economy & Management Research Institute (KEMRI), "Development of business model and economical evaluation for utilization of medium and large ESS of electric power company", 2014.

- [8] Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), "A Study on the Improvement of Grid Auxiliary Service for Efficiency of Power Market", 2007.
- [9] Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Demand Management Project Evaluation Report.
- [10] Han Na Gwon, Ho Yeon So, Kyung Soo Kook, Sung Han Wie, Woon Tae Sohn, "An Analysis on AGC Performance Index of Generators for the Application on Korean Power System", The Korean Institute of Power Electronics, pp. 38-40, Nov. 2014.
- [11] Sung-Sik Choi, Jae-Beom Park, Byung-Ki Kim, Ju-Kwang Lee, In-Cheol Lee, Dae-Seok Rho, "The Study on the Performance Evaluation Method of Energy Storage System for Frequency Regulation", Journal of KAIS, Vol. 16, No. 1, pp. 27-29, May 2015.
- [12] Ju-Kwang Lee, Sung-Sik Choi, Jae-Beom Park, Soo-Young Park, Dae-Seok Rho, "The Study on the AGC Performance Evaluation Method of Energy Storage System for Frequency Regulation", Journal of KAIS, Vol. 16, No. 1, pp. 27-29, Dec. 2015.
- [13] Ju-Kwang Lee, Yu-Rim Kim, Myung-Hoon Lee, Mi-Sung Kim, Eung-Sang Kim, Dae-Seok Rho, "A Study on the Economic Evaluation of ESS for Frequency Regulation Application", The Korean Institute of Power Electronics, pp. 270-272, Nov. 2016.

이 주 광(Jul-Kwang, Lee) [정회원]



- 1988년 2월 : 고려대학교 전기공학 (공학사)
- 1990년 2월 : 고려대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1990년 3월 ~ 1995년 5월 : 한국 전기연구소 연구원
- 2016년 8월 ~ 현재 : ㈜ 삼신기전 연구소장

<관심분야>
에너지관리시스템, 에너지저장시스템, 마이크로그리드

최 성 식(Sung-Sik Choi) [정회원]



- 2010년 5월 : 한국기술교육대학교 정보통신공학부(공학사)
- 2014년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>
배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드, ESS

강 민 관(Min-Kwan Kang) [정회원]



- 2005년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과(공학사)
- 2007년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>
배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

노 대 석(Dae-Seok Rho) [정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>
전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석