

# PSCAD/EMTDC를 이용한 주파수조정용 ESS의 계통영향성 평가 모델링에 관한 연구

## A Study on an Evaluation Modeling of Power System Performance for Frequency Regulation ESS Based on the PSCAD/EMTDC

최 성 식\* · 강 민 관\* · 이 후 동\* · 남 양 현\* · 박 지 현\* · 노 대 석\*

(Sung-Sik Choi · Min-Kwan Kang · Hu-Dong Lee · Yang-Hyun Nam · Ji-Hyun Park · Dae-Seok Rho)

**Abstract** - Recently, the large scaled energy storage system(ESS) which has various functions such as peak saving, demand management, output stabilization of renewable energy and frequency regulation(FR) is being energetically installed and operated. Especially, as the use case of frequency regulation ESS, the KEPCO has demonstrated the total of 376[MW] ESS since 2014. However, there are no operational experiences and international technical standards on frequency regulation application in ESS. Therefore, this paper propose the evaluation algorithm for power system performance of ESS by considering the frequency characteristics between governor of existing generator and frequency regulation ESS, in order to verify the power system performance of ESS. And also, this paper propose an evaluation modeling for small scaled power system including the existing generator, frequency control ESS and customer loads based on the PSCAD/EMTDC S/W. From the simulation results in 360[MW] model power system, it is confirmed that frequency regulation ESS has better performances than conventional generators.

**Key Words** : Energy storage system, Performance evaluation, Power quality, Frequency regulation, PSCAD/EMTDC

### 1. 서 론

최근, 피크저감 및 수요관리, 신재생에너지전원의 출력안정화, 주파수조정(FR, frequency regulation) 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)에 대한 관심이 전 세계적으로 크게 증가하고 있다[1]. 우리나라도 정부 주도하(K-ESS 2020)에 2020년까지 6.4조원 규모의 기술개발과 설비투자, ESS 설치 의무화 정책을 적극적으로 추진하고 있다. 또한, 한 전에서는 2014년도부터 시범용으로 52[MW]의 주파수조정용 ESS를 설치하기 시작하여, 현재 총 376[MW]의 주파수조정용 ESS를 운영하고 있다[2]. 여기서, 주파수조정용 ESS는 전력계통의 수요와 공급 특성에 따라 충·방전 기능을 수행하는 것을 말하며, 기존에 주파수조정을 담당하고 있는 발전기에 비하여 응답속도가 상당히 빠르기 때문에 주파수조정에 효과적일 것으로 기대하고 있다[3-5]. 하지만, 대규모의 주파수조정용 ESS가 도입되어 운용되는 경우, 유효전력만을 공급하기 때문에 전력계통의 안정성을 악화시킬 가능성이 있다. 또한, 주파수조정용 ESS에 대한

운용상의 경험 및 국제적인 기술표준이 없는 상황임으로, 주파수조정용 ESS의 운용에 따른 전기품질, 계통영향성, 기여도 등에 대한 종합적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 대규모 주파수조정용 ESS가 전력계통에 미치는 영향성을 평가하기 위하여, 주파수조정용 ESS의 모델링 및 계통영향성 평가 알고리즘을 제안한다. 즉, 기존 발전기의 조속기와 ESS에 의한 주파수 응답특성을 비교하여, 주파수조정용 ESS 도입에 따른 계통영향성을 평가할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 또한, 전력계통 해석용 상용소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 기존 발전기와 주파수조정용 ESS로 구성된 전력계통의 모델링 방안을 제안한다. 이를 바탕으로 제주계통의 1/2의 모델 계통을 대상으로 다양한 시나리오에 따른 시뮬레이션을 수행하여, 제안한 평가알고리즘과 모델링이 주파수조정용 ESS 도입에 따른 전력계통 영향성 평가에 대한 유용성을 확인한다.

### 2. 주파수조정용 ESS의 계통영향성 평가알고리즘

기존의 주파수조정은 전력계통의 수요와 공급에 따라 발전기가 수초에서 수분 사이의 반응속도로 출력을 증발 또는 감발하여 주파수를  $60 \pm 0.2$ [Hz] 범위 이내로 일정하게 유지한다[6]. 하지만 주파수조정용 ESS는 0.2초 이내의 반응속도로 충·방전을 수행하여 계통의 주파수를 일정하게 유지할 수 있다[7]. 따라서, 기존

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Engineering, Korea University of Technology and Education, Korea  
E-mail : dsrho@kut.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education, Korea.

Received : February 6, 2018; Accepted : July 25, 2018

발전기의 주파수조정에 비하여 응답속도가 빠른 주파수조정용 ESS가 운용되는 경우, 전력계통의 주파수 특성이 달라지기 때문에, 여기에서는 주파수조정용 ESS에 의한 계통영향성 평가알고리즘을 제안한다. 즉, 기존 발전기의 조속기에 의한 주파수제어 특성과 주파수조정용 ESS에 의한 주파수제어 특성을 비교하여 계통영향성을 평가하며, 이에 대한 상세한 절차는 다음과 같다.

**[Step 1]** 대상계통의 크기 및 부하 상태를 설정하고 일정수준 이상의 주파수가 변동되도록 부하급변을 발생시킨다.

**[Step 2]** 부하변동 발생시, 기존 발전기의 조속기에 의한 주파수제어를 수행하고 전력계통의 주파수를 측정하여, 최소주파수 ( $F_{gov\_min}$ ), 최소주파수 도달시간( $T_{gov\_min}$ ) 및 최대주파수 회복시간( $T_{gov\_max}$ )을 기준치로 설정한다.

**[Step 3]** 동일한 부하변동에 대하여 주파수조정용 ESS에 의한 주파수제어를 수행하고 전력계통의 주파수를 측정하여 최소주파수( $F_{ESS\_min}$ ), 최소주파수 도달시간( $T_{ESS\_min}$ ) 및 최대 주파수 회복시간( $T_{ESS\_max}$ )을 산출한다.

**[Step 4]** [Step 2]에서 기준치로 설정한 최소주파수 ( $F_{gov\_min}$ )와 [Step3]에서 산출한 최소주파수( $F_{ESS\_min}$ )를 비교하여 서로 같지 않은 경우에는 식 (1)과 같이 전력계통의 주파수 변화량과 ESS의 출력 변화량 그리고 주파수 조정용 ESS의 용량을 이용하여 주파수조정용 ESS의 응동특성을 산출한다.

$$\delta_{ESS} = \frac{\frac{\Delta f}{60}}{\frac{\Delta P}{ESS_{cap}}} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $\delta_{ESS}$  : 주파수조정용 ESS의 응동특성,  $\Delta f$  : 주파수 변화량,  $\Delta P$  : ESS의 출력 변화량,  $ESS_{cap}$  : 주파수조정용 ESS의 용량

**[Step 5]** [Step 2]에서 기준치로 설정한 최소주파수 도달시간( $T_{gov\_min}$ )과 [Step3]에서 산출한 최소주파수 도달시간( $T_{ESS\_min}$ )를 비교하여 서로 같지 않은 경우에는 식 (2)를 이용하여 주파수조정용 ESS의 주파수제어 여유도( $\alpha$ )를 평가한다.

$$\alpha = - \left( \frac{T_{gov\_min} - T_{ESS\_min}}{T_{gov\_min}} \right) \times 100 \quad (2)$$

**[Step 6]** [Step 2]에서 기준치로 설정한 최대주파수 도달시간( $T_{gov\_max}$ )과 [Step3]에서 산출한 최대주파수 도달시간( $T_{ESS\_max}$ )를 비교하여 서로 같지 않은 경우에는 식 (3)을 이용하여 주파수조정용 ESS의 주파수 회복특성( $\beta$ )을 구한다.

$$\beta = \left( \frac{T_{gov\_max} - T_{ESS\_max}}{T_{gov\_max}} \right) \times 100 \quad (3)$$

**[Step 7]** 기존 발전기의 조속기에 상응하는 주파수조정용 ESS의 등가용량을 산출하기 위하여, 기준치로 설정한 최소주파수 ( $F_{gov\_min}$ )보다 큰 경우에는 주파수조정용 ESS의 용량을 감소시키

고, 기준치 보다 작은 경우에는 주파수조정용 ESS의 용량을 증가시켜, [Step 3]에서 [Step 6]을 반복 수행하고, 기준치와 동일한 경우에 평가를 완료한다.

상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 1과 같다.

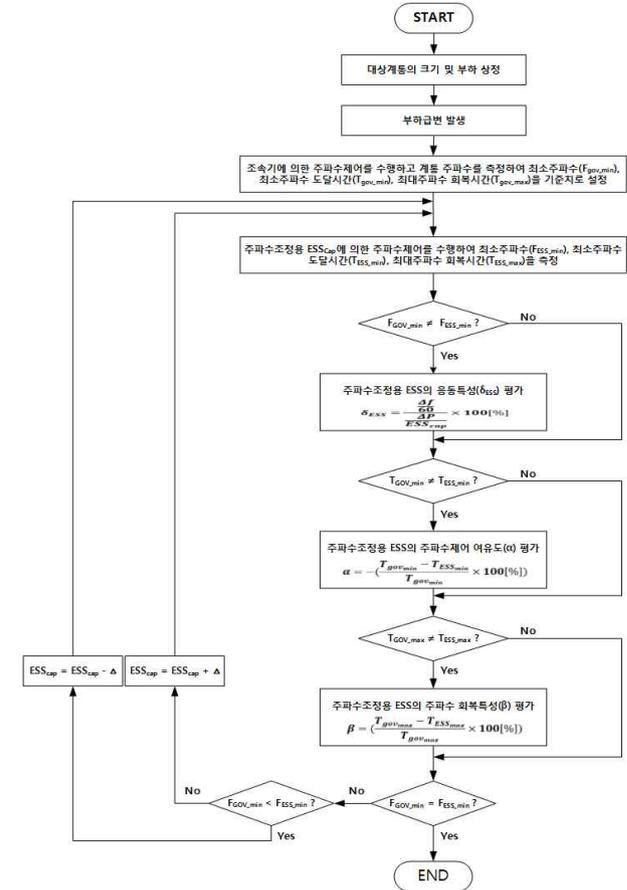


그림 1 주파수조정용 ESS의 계통영향성 평가알고리즘

Fig. 1 Influence evaluation algorithm for power system of frequency regulation ESS

### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 주파수조정용 ESS의 계통영향성 평가 모델링

주파수조정용 ESS의 도입에 따른 계통영향성을 평가하기 위해 전력계통 해석 상용소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 기존의 동기발전기, 주파수조정용 ESS, 부하로 구성된 전력계통의 모델링 방안을 제안한다[8-11].

#### 3.1 동기발전기 모델링

동기발전기의 제어기는 출력전압을 조정하는 여자기와 유효전력을 제어하는 조속기로 구성된다. 여자기는 동기발전기에서 발생하는 무효전력을 제어하여, 출력전압을 정전압으로 제어하는

역할을 수행한다. 또한, 회전기의 계자전압 및 계자전류를 제어함으로써 발전기의 보호기능역할도 담당한다. 이러한 기능을 가지는 여자기는 그림 2와 같이 현재 많이 사용되고 있는 IEEE의 ST1A 타입의 정지형 여자방식을 이용하고, 이를 PSCAD/EMTDC로 나타내면 그림 3과 같다.

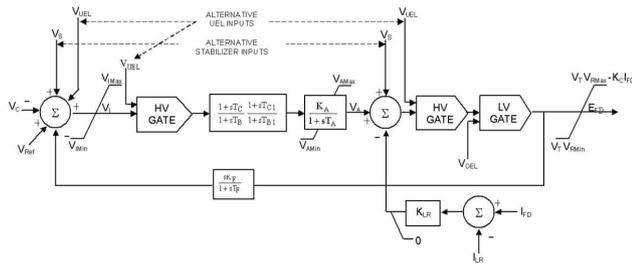


그림 2 정지형 여자시스템 블록도  
Fig. 2 Diagram of static excitation system(ST1A)

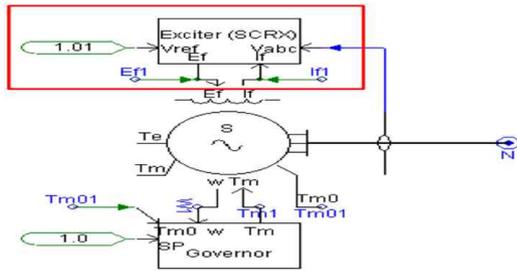


그림 3 여자기 모델링  
Fig. 3 Modeling of excitor

한편, 동기발전기의 조속기는 회전속도를 일정한 값으로 유지하기 위해 사용하는 제어장치로서, 계통의 수요전력량만큼 제어하는 유효전력 제어부와 동기발전기 속도를 계통의 주파수(60[Hz])에 추종하도록 제어하는 속도제어부로 구성된다. 이러한 조속기는 그림 4와 같이 기계 유압 제어 방식의 GOV2를 사용하고, 이를 PSCAD/EMTDC로 모델링하면 그림 5와 같다.

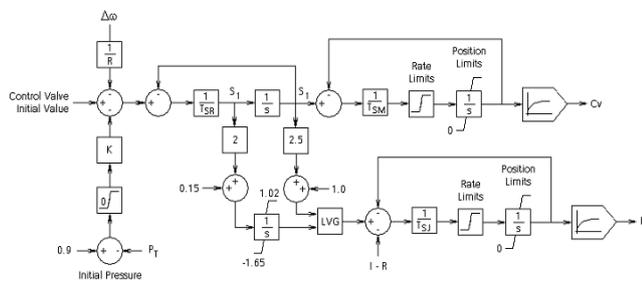


그림 4 조속기의 제어 블록도  
Fig. 4 Control diagram of governor(GOV2)

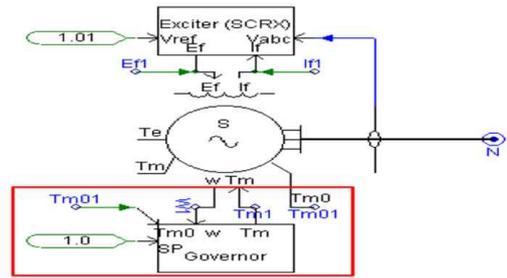


그림 5 조속기 모델링  
Fig. 5 Modeling of governor

### 3.2 주파수조정용 ESS의 모델링

목표로 하는 주파수조정용 ESS의 유효전력과 무효전력의 출력 값을 얻기 위하여, ESS의 출력을 결정하는 d-q축의 기준전류 ( $I_{ref-d}$ ,  $I_{ref-q}$ )를 산정하여야 한다. 즉, ESS의 기준링크전압과 목표전력을 의한 DC 링크전압을 서로 비교하여 전압차를 구하고, 전압차를 PI제어에 의하여 전류로 변환하면 d-q축의 기준전류를 구할 수 있다. 따라서, d-q축의 기준전류를 구하는 식을 나타내면 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$I_{ref-d} = (Kp + \frac{Ki}{s})(V_{DC-d}^* - V_{DC-d}) \quad (4)$$

$$I_{ref-q} = (Kp + \frac{Ki}{s})(V_{DC-q}^* - V_{DC-q}) \quad (5)$$

여기서,  $I_{ref-d}$ : ESS 출력을 위한 d축 기준전류,  $I_{ref-q}$ : ESS 출력을 위한 q축 기준전류,  $V_{DC-dq}^*$ : 기준 DC 링크전압,  $V_{DC-dq}$ : 목표 DC링크전압

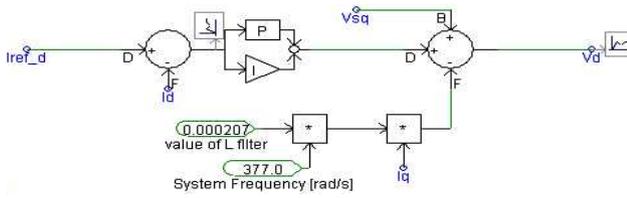
또한, d-q축 기준전류가 음의 값을 가질 때 ESS를 충전하고, 양의 값을 가질 때 ESS를 방전하기 위하여, 기본 전류제어 알고리즘에 적용하면 식 (6), 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d)(Kp + \frac{Ki}{s}) - I_q \times \omega L + V_{sq} \quad (6)$$

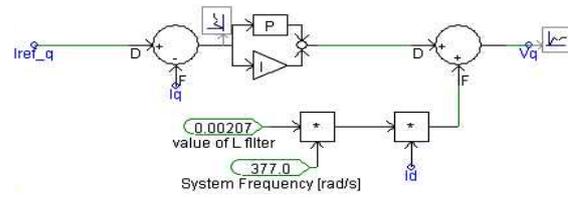
$$V_q = (I_{ref-q} - I_q)(Kp + \frac{Ki}{s}) - I_d \times \omega L \quad (7)$$

여기서,  $V_d$ ,  $V_q$ : 인버터 출력을 위한 d-q축 전압,  $I_d$ ,  $I_q$ : d-q 동기좌표계에 의한 계통전류,  $V_{sq}$ : 계통의 순시전압

상기의 식 (6), 식 (7)를 이용하여 세부적인 전류제어 알고리즘을 모델링하면 그림 6과 같다. 한편, 상기의 d-q축의 기준전류를 구하는 관계식 식 (4)와 식 (5)를 전류제어 알고리즘인 식 (6)과 식(7)에 적용하여, 정전류원으로 충·방전을 수행할 수 있도록 주파수조정용 ESS를 모델링하면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.



(a) 전류제어 모델링(d축)



(b) 전류제어 모델링(q축)

그림 6 전류제어 모델링

Fig. 6 Modeling of current controller

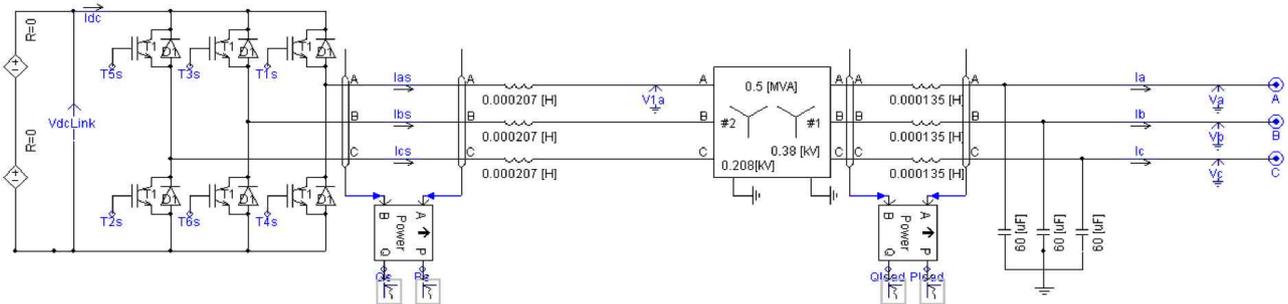


그림 7 주파수조정용 ESS 모델링

Fig. 7 Modeling of frequency regulation ESS

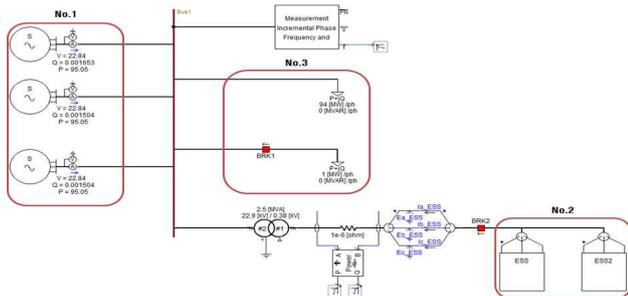


그림 8 전체계통 모델링

Fig. 8 Total modeling of power system

대상으로 120[MW]의 동기발전기 3대, 2[MW]의 주파수조정용 ESS, 282[MW]의 부하로 구성하였다. 또한, 주파수조정용 ESS의 계통영향성 평가를 위하여, 3가지의 모의 시나리오를 상정하였다. CASE I은 3[MW]의 부하가 급격하게 변동하는 경우, 3[MW]의 발전기 조속기가 동작하여 전력계통의 주파수 응답특성을 평가하는 것이다. CASE II는 CASE I과 동일한 조건에서, 1[MW]의 조속기와 2[MW]의 주파수조정용 ESS가 동작하여 전력계통의 주파수 응답특성을 평가하고, CASE III은 CASE II의 초기조건에서 주파수조정용 ESS의 용량을 감소시켜가면서 발전기의 조속기(2[MW])에 상응하는 ESS의 대체용량을 평가하는 것이다. 여기서 주파수조정용 ESS의 용량을 2[MW]로 상정한 이유는 주파수조정용 ESS의 용량을 3[MW] 가까이 투입하는 경우, 주파수 변동이 거의 발생하지 않으므로 주파수조정용 ESS의 계통영향성을 정확하게 평가하기 위한 것이다.

### 3.3 전력계통 모델링

상기의 내용을 바탕으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 동기발전기 3대, 주파수조정용 ESS, 부하 등으로 구성된 전력계통을 모델링하면 그림 8과 같다. 여기에서, No. 1 부분은 동기발전기, No. 2는 주파수조정용 ESS, No. 3은 부하를 나타낸 것이다.

## 4. 시뮬레이션 결과 및 특성 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

주파수조정용 ESS의 도입에 따른 전력계통의 영향성을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 제주계통의 1/2 규모의 모델 계통을

### 4.2 PSCAD/EMTDC 모델링의 성능 평가

#### 4.2.1 동기발전기의 출력특성 분석

앞에서 제시한 PSCAD/EMTDC를 이용한 동기발전기 모델링의 신뢰성을 확인하기 위하여, 동기발전기의 출력특성을 분석하였다. 즉, 전력계통의 부하를 282[MW]에서 3초 후에 3[MW]의 부하가 급격하게 증가되도록 설정한 경우, 그림 9와 같이 동기발전기 3대의 출력이 각각 94[MW]에서 3초 후에 목표치인 95[MW]로 잘 제어되고 있음을 확인할 수 있었다. 단, 실제의 동기발전기의 출력 특성은 지연특성이 있지만, 여기서는 고려하지 않았다.

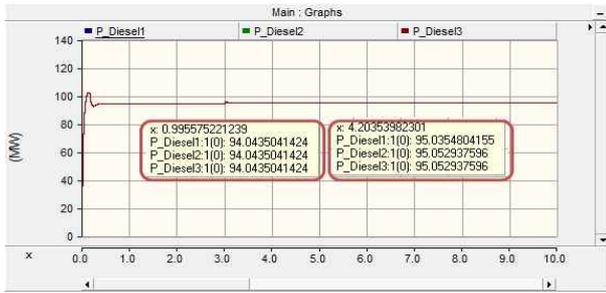


그림 9 동기발전기의 출력 특성  
Fig. 9 Output characteristics of synchronous generator

### 4.2.2 주파수조정용 ESS의 출력특성 분석

앞에서 제시한 PSCAD/EMTDC를 이용한 주파수조정용 ESS 모델링의 신뢰성을 확인하기 위하여, 동기발전기와 동일한 조건에서 ESS의 출력특성을 분석한 결과, 그림 10과 같이 ESS의 출력이 3초 후에 목표치인 2[MW]로 잘 제어되고 있음을 확인하였다.

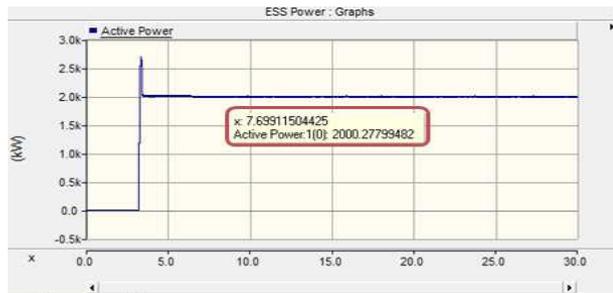


그림 10 주파수조정용 ESS의 출력 특성  
Fig. 10 Output characteristic of ESS

## 4.3 주파수조정용 ESS의 계통영향성 평가

### 4.3.1 기존 발전기의 조속기에 의한 주파수 응답특성

먼저 기존 발전기의 조속기에 의한 전력계통의 주파수 응답특성을 분석하면 그림 11과 같이 나타낼 수 있다. 즉, Case I의 운용조건에 따라, 3[MW]의 부하가 급격하게 변동되는 경우, 3[MW]의 조속기가 동작하여(시간지연은 고려하지 않음), 전력계통의 주파수가 부하변동 후 약 3초 후에 최저점인 59.889[Hz]까지 하락하고, 18.1초에 다시 59.983[Hz]까지 회복되는 특성을 확인할 수 있었다.

### 4.3.2 주파수조정용 ESS에 의한 주파수 응답특성

여기서는 Case II의 운용조건에 대하여, 주파수조정용 ESS에 의한 전력계통의 주파수 응답특성을 분석하면 그림 12와 같다. 즉, 3[MW]의 부하가 급격하게 변동되는 경우, 1[MW]의 조속기와 2[MW]의 주파수조정용 ESS가 동작하여, 전력계통의 주파수가 부하변동 후 약 2.8초 후에 최저점인 59.919[Hz]까지 하락하고,

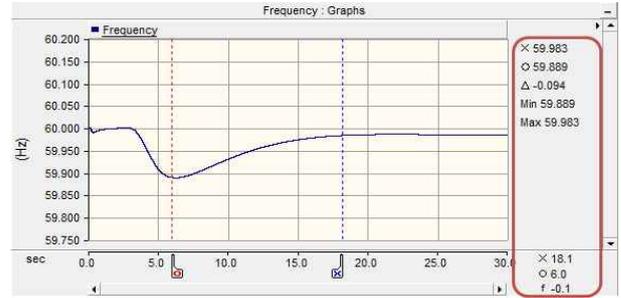


그림 11 조속기에 의한 주파수 특성  
Fig. 11 Frequency characteristics of generator governor

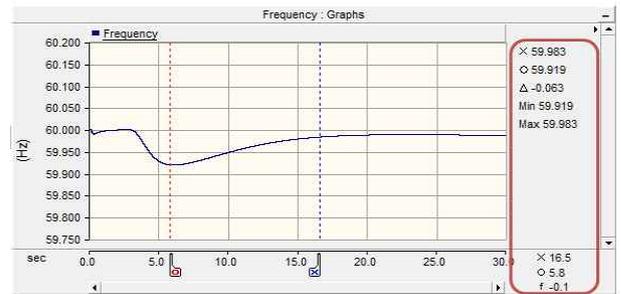
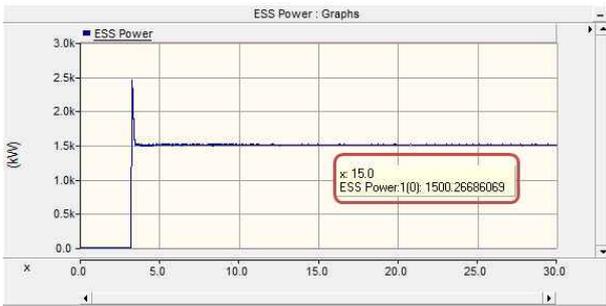


그림 12 주파수조정용 ESS에 의한 주파수 특성  
Fig. 12 Frequency characteristics of ESS

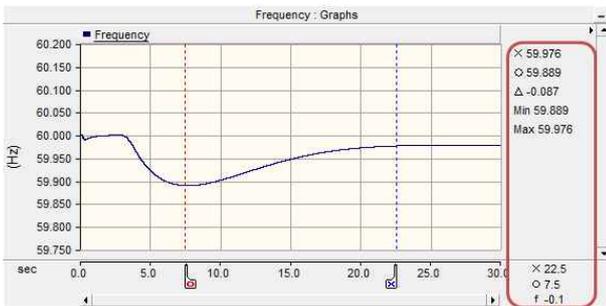
16.5초에 다시 59.983[Hz]까지 회복되는 특성을 확인할 수 있었다. 따라서, 기존 발전기의 조속기에 의한 주파수 응답특성과 비교하면, 3[MW] 조속기에 의한 주파수 최대 저하치는 59.889 [Hz]이지만, 2[MW]의 용량을 주파수조정용 ESS로 대체하는 경우, 주파수 최대 저하치는 59.919[Hz]까지만 하락하여, 전력계통의 주파수 변동폭을 약 0.03[Hz] 정도 개선시킬 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 조속기는 18.1초에 주파수가 59.983[Hz]까지 회복되지만, 주파수조정용 ESS는 16.5초에 59.983[Hz]까지 회복되어 주파수 제어 성능이 약 1.6초 정도 개선될 수 있음을 알 수 있었다.

### 4.3.3 주파수조정용 ESS의 용량특성에 의한 성능평가

주파수조정용 ESS의 성능을 평가하기 위하여, 기존 발전기의 조속기에 의한 주파수 특성(59.889[Hz])에 상응하는 주파수조정용 ESS의 등가용량을 산출하였다. 즉, Case II의 운용조건을 초기상태로 가정하고, ESS의 용량을 100[kW]씩 변동시켜가면서 주파수 응답특성을 확인한 결과, 그림 13과 같이 1.5[MW] 용량의 ESS가 투입되면 기존의 조속기와 동일한 주파수 최저점인 59.889[Hz]까지 도달함을 확인할 수 있었다. 따라서, 주파수조정용 ESS는 1.5[MW]의 용량으로도 2[MW]의 조속기와 동일한 성능을 확보할 수 있어서 주파수조정용 ESS의 주파수 응답특성이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한, 기존의 조속기는 부하변동 후 3초 만에 주파수의 최저점인 59.889[Hz]까지 하락하지만, 1.5[MW]의 주파수조정용 ESS는 약 4.5초 후에 최저점인 59.889 [Hz]까지 도달하기 때문에 주파수조정용 ESS에 의한 주파수제어



(a) 주파수조정용 ESS의 출력



(b) 주파수조정용 ESS의 주파수 특성

그림 13 주파수조정용 ESS의 주파수 특성(1.5[MW])

Fig. 13 Frequency characteristics of ESS(1.5[MW])

가 전력계통의 주파수제어 여유도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 대규모 주파수조정용 ESS가 전력계통에 미치는 영향성을 평가하기 위하여, 기존 발전기의 조속기와 ESS에 의한 주파수제어 특성을 비교하여, 계통영향성을 평가할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 또한, 전력계통 해석용 상용소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 기존 발전기와 주파수조정용 ESS, 부하로 구성된 전력계통의 모델링을 제시하였다. 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PSCAD/EMTDC를 이용한 모델링의 신뢰성을 확인하기 위하여, 동기발전기와 주파수조정용 ESS의 출력특성을 분석한 결과, 동기발전기와 ESS 모두 목표 출력이 잘 제어됨을 확인할 수 있었다.
- (2) 기존 발전기의 조속기에 의한 주파수 응답특성의 운용조건 (Case I)에 따라, 3[MW]의 부하가 급격하게 변동되는 경우, 3[MW]의 조속기가 동작하여 전력계통의 주파수가 부하변동 후 3초 후에 최저점인 59.889[Hz]까지 하락하고, 18.1초에 다시 59.983[Hz]까지 회복되는 특성을 확인할 수 있었다.
- (3) 주파수조정용 ESS에 의한 주파수 응답특성의 운용조건 (Case II)에 따라, 1[MW]의 조속기와 2[MW]의 주파수조정

용 ESS가 동작하는 경우, 전력계통의 주파수는 부하변동 후 2.8초 후에 최저점인 59.919[Hz]까지 하락하고, 16.5초에 다시 59.983[Hz]까지 회복되는 특성을 확인할 수 있었다. 즉, 기존 발전기의 조속기에 의한 주파수 응답특성과 비교하면, 3[MW] 조속기에 의한 주파수 최대 저하치는 59.889[Hz]이지만, 2[MW]의 용량을 주파수조정용 ESS로 대체하는 경우, 주파수 최대 저하치는 59.919[Hz]까지만 하락하여, 전력계통의 주파수 변동폭을 약 0.03[Hz] 정도 개선시킬 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 조속기는 18.1초에 주파수가 다시 59.983[Hz]까지 회복되지만, 주파수조정용 ESS는 16.5초에 다시 59.983[Hz]까지 회복되어 주파수제어 성능이 약 1.6초 정도 개선될 수 있음을 알 수 있었다.

- (4) 주파수조정용 ESS의 용량특성에 의한 성능평가 조건(Case III)에 따라 시뮬레이션을 수행한 결과, 1.5[MW] 용량의 ESS가 투입되면 기존의 조속기와 동일한 주파수 최저점인 59.889[Hz]까지 도달함을 확인할 수 있었다. 즉, 주파수조정용 ESS는 1.5[MW]의 용량으로도 2[MW]의 조속기와 동일한 성능을 확보할 수 있어서 주파수조정용 ESS의 주파수 응답특성이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한, 조속기는 부하변동 후 3초 만에 주파수의 최저점인 59.889 [Hz]까지 하락하지만, 1.5[MW]의 주파수조정용 ESS는 약 4.5초 후에 최저점인 59.889[Hz]까지 도달하기 때문에 주파수조정용 ESS에 의한 주파수제어가 전력계통의 주파수제어 여유도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20163010012310, no.20172410100030)로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 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, November, 2015.
- [2] Nam-gil Baek, "Promotion status of electric storage system(ESS) for frequency regulation (F/R) of KEPCO", *Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 12-17, May, 2015.
- [3] Woo-Yeong Choi, Ga-Ram Yu, Kyung-Soo Kook, "Operating Method of BESS for Providing AGC Frequency Control Service Considering Its Availability Maximization", *Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol 65, no. 7, pp. 1161-1168, July, 2016.

[4] Han Na Gwon, Kyung Soo Kook, "A Study on the Effect of Dynamic Deadband for Frequency Control through Automatic Generation Control", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 156-157, July, 2017.

[5] Daniel-Ioan Stroe, Vaclav Knap, Maciej Swierczynski, Ana-Irina Stroe, and Remus Teodorescu, "Operation of a Grid-Connected Lithium-Ion Battery Energy Storage System for Primary Frequency Regulation: A Battery Lifetime Perspective", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 430-438, Jan. 2017.

[6] Korea Power Exchange(KPX), "Electricity Market Operation Council", <https://www.kpx.info/eBiz/>, 2016.

[7] Korea Electrical Engineering & Science Research Institute, "Report of A Study on Performance Verification and Business Activation Plan of ESS Pilot Project for Frequency Adjustment," May, 2015.

[8] IEEE Std 421.5, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", 2005.

[9] ByungKi Kim, "A Study on the Voltage Stabilization Method of Distribution System Using Step Voltage Regulator and Energy Storage System", August, 2015.

[10] Sungsik Choi, "Modeling of Performance Test Devices for MW Class Energy Storage System Using the PSCAD/EMTDC", *Conference of the korea academia-industrial cooperation society*, Dec. 2016.

[11] Daeseok Rho, "Modeling of ESS Performance Test Devices Using the PSCAD/EMTDC", *Fall Conference for Society A of KIEE(Korean Institute of Electrical Engineers)*, Nov, 2016

저 자 소 개



**최 성 식(Sung-Sik Choi)**

2010년 5월 : 한국기술교육대학교 정보통신공학부(공학사), 2014년 8월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 2015년 2월~현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중  
 <관심분야> 배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로 그리드, 품질해석, ESS



**강 민 관 (Min-Kwan Kang)**

2005년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과(공학사), 2007년 2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 2016년 9월~현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중  
 <관심분야> 신재생에너지, 전력계통, 마이크로그리드



**이 후 동 (Hu-Dong Lee)**

2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과(공학사), 2016년 9월~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학 석사과정 재학 중  
 <관심분야> 배전계통, 분산전원, 마이크로그리드



**남 양 현(Yang-Hyun Nam)**

2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과(공학사), 2016년 9월~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학 석사과정 재학 중  
 <관심분야> 배전계통 운영, 신재생에너지, 마이크로그리드



**박 지 현 (Ji-Hyun Park)**

2017년 2월 : 청주대학교 태양광에너지공학과(공학사), 2017년 9월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학중  
 <관심분야> 신재생에너지, 마이크로그리드



**노 대 석 (Dae-Seok Rho)**

1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학사), 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 1997년 3월 : 일본 북해도대학교대학원 전기공학과(공학박사), 1987년 3월~1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원, 1999년 3월~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수  
 <관심분야> 전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석