

# 주파수추종 운전 적용을 위한 BESS의 운용 방법 및 효과

## Operation of Battery Energy Storage System for Governor Free and its Effect

조성민\* · 장병훈\* · 윤용범\* · 전웅재\* · 김철우\*

(Sung-Min Cho · Byung-Hoon Jang · Yong-Bum Yoon · Woong-jae Jeon · Chulwoo Kim)

**Abstract** - As the development of Battery Energy Storage System(BESS) and the increasing of intermittent energy sources like wind power and photovoltaic, the application of BESS in load frequency control is considered as an effective method. To evaluate the effectiveness of BESS application in frequency control, we defined a governor free model of BESS to conduct dynamic simulation. Using the BESS dynamic model, we implemented the power system dynamic model including steam, gas and hydro turbine generators. In this paper we study the control performance of BESS in primary frequency control. The effect of BESS speed regulation rate and response time on governor free operation is investigated. In addition, we compared BESS from steam turbine generator in view point of frequency regulation..

**Key Words** : Battery energy storage system, Frequency control, Governor free, Speed regulation rate

### 1. 서 론

최근 BESS(Battery Energy Storage System)를 활용한 주파수 조정에 대한 관심이 매우 높다. BESS는 부하이전(Load Shift), 신재생 출력 안정화(Renewable Output Smoothing), 비상전원(Emergency Back-up Source) 등 많은 분야에 활용가능하다[1, 2]. BESS 기술 중 납축전지(Lead-acid)의 활용은 UPS(Uninterruptible Power Supply)와 부하이전에 집중되어 왔다. 그러나 최근 리튬이온전지(Lib, Lithium-ion battery)가 모바일기기에서부터 전력용 ESS 등에 활용되면서 수십MW급 리튬이온전지의 활용에 대한 관심이 높다. 특히 리튬이온전지의 빠른 응답속도를 활용하기 위한 주파수 조정에 대한 많은 연구와 시범 사업이 진행 중이다[3, 4].

전력계통의 주파수는 주파수 추종(Governor Free)운전과 자동발전제어(AGC, Automatic Generation Control)운전에 의해 기본적으로 유지되어 진다. 주파수 추종운전(G/F)은 개별 발전기의 조속기(Governor)에 설정되어 있는 속도조정율(Speed Regulation Rate)에 의해서 계통의 주파수 변동 시 발전기의 출력이 변동되는 동작을 말한다. 주파수 추종 응답 출력은 일반적으로 10초 이내에 발생하여 30초 이상을 유지하도록 전력시장운영 규칙에 명시 되어 있다. 자동발전제어(AGC)는 계통 EMS(Energy Management System)에서 주파수를 계측하여 60Hz를 유지하기 위한 제어기에 의한 출력 보상량을 각 발전기의 출력 증감발율(Ramp up/Down Rate)에 따라서 발전량을 배분한다. 자동발전제어에 의한 반응은 30초이내에 응동하여 30분 이상을 유지 가능하도록 전력시장 운영

규칙에 명시 되어 있다[5, 6].

BESS에 관한 연구는 미국과 일본, 유럽 그리고 대한민국을 중심으로 진행되고 있다. 미국은 주파수 조정 보조서비스에서 BESS를 활용한 자동발전제어(AGC)의 연구가 활발히 진행되고 있다[7]. 일본에서는 리튬배터리 뿐만 아니라 RFB(Redox Flow Battery)를 활용하여 주파수 추종(G/F) 기능이 없이 자동발전제어(AGC)만을 수행하는 RFB의 주파수 조정 효과에 대하여 발표하였다[8]. 참고 문헌 [9]에서는 유럽 주파수 기록을 바탕으로 주파수 추종용 BESS의 적정 용량을 경제성 기반의 목적함수 분석을 통하여 도출하는 방법을 제시하였다. 이러한 선행 연구에서 발표된 BESS에 관한 연구는 주파수 관리를 위해 BESS를 운영하는 제어 방법이 연구마다 상이하고 배터리의 응답속도에 관한 실증결과를 반영하지 않고 있다. 또한 국가마다 주파수를 유지하기 위한 제어 개념이 상이하고 계통을 구성하는 발전기 특성이 상이하기 때문에 그 BESS 적용 효과를 국내에서 그대로 기대하기 힘들다.

본 논문에서는 배터리를 활용한 주파수 추종운전의 운용 방법을 제시하고 석탄화력 발전기의 주파수 추종 운전 효과와 비교하여 분석하였다. 또한 제주 조천 변전소에서의 Lib 실증 운용 결과를 BESS 모델에 고려하였다.

### 2. 발전기 및 BESS 모델

주파수 추종운전(G/F)은 발전기의 조속기(Governor)의 동작 특성에 의해 발전기의 출력이 제어된다. 국내의 전력계통은 크게 원자력, 기력, 가스, 수력의 발전기로 구성된다. 이중 원자력은 주파수 추종운전을 하지 않는다. 전력시장운영규칙에는 주파수 추종운전과 자동발전제어(AGC) 운전을 위해 주파수조정예비력을 1,500MW이상 확보하도록 하고 있다[6].

본 논문에서는 다음과 같은 기력발전, 가스터빈발전, 수력의 발전

† Corresponding Author : KEPCO Research Institute, Korea  
E-mail : chosmin@kepco.co.kr

\* KEPCO Research Institute, Korea

Received : August 29, 2014; Accepted : November 20, 2014

기 조속기 모델을 MATLAB에서 구현하고 여기에 BESS의 모델을 구성하여 활용하였다.

2.1 발전기 모델

기력발전기의 모델은 PSS/E의 IEEE1의 모델을 활용하였다 [10]. 주파수의 변동량을 입력받아 재가열(Reheat) 부분까지 고려하여 출력 PM1이 계통에 입력되는 발전량이 된다. 기력발전기 모델에서 사용된 변수들은 표 1에 정리하였다.

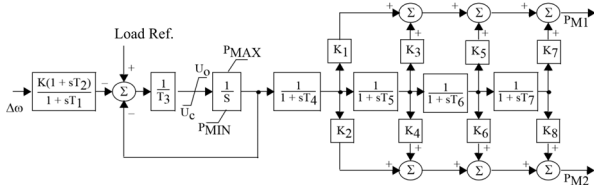


그림 1 기력발전기 조속기 모델  
Fig. 1 Steam Turbine Governor Model(IEEE1)

그림 1에서 K는 속도조정율의 역수이고 T3는 적분제어기의 적분계수의 역수이다. K1~K8은 재가열된 터빈의 출력 배분을 나타낸다. 일반적으로 고압(High Pressure, HP), 중압(Intermediate Pressure, IP), 저압(Low Pressure, LP) 터빈의 3단 구성을 갖기 때문에 K1, K3, K5만 사용하고 나머지는 0의 값으로 하였다. T4, T5, T6은 고압, 중압, 저압 터빈의 출력에 대한 지연(time lag) 시정수이다. 기력발전기의 속도조정율은 5~6%의 값을 일반적으로 갖는다. 국내 전체 기력발전기의 용량을 가중치로 사용한 가중평균 속도조정율은 약 5.67%로 이의 역수가 K값인 17.6으로 반영되어 있다.

표 1 기력 발전기 조속기 모델 변수  
Table 1 Steam Turbine Governor Model Parameters

K	T1	T2	T3	Uo	Uc	P_MAX	P_MIN	T4	K1
17.6	0	0	0.1	0.1	-0.2	1	0	0.3	0.32
K2	T5	K3	K4	T6	K5	K6	T7	K7	K8
0	15	0.27	0	0.38	0.42	0	0	0	0

수력발전기의 조속기 모델은 그림 2에 나타내었다. 수력모델은 조속기(T<sub>R</sub>)와 서보 모터(T<sub>C</sub>), 물(T<sub>W</sub>)의 시정수(Time Constant)가 반영되어 있다. 또한 수력 터빈은 게이트의 위치변화 초기에 반대의 터빈 출력이 발생하는 특징을 갖고 있다. 이를 보상하기 위한 과도 droop 보상기(temporary droop compensator)가 반영되어 있다[5].

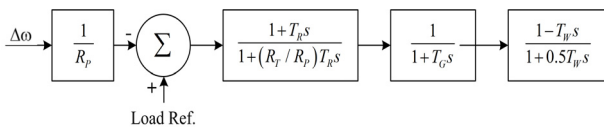


그림 2 수력발전 조속기 모델  
Fig. 2 Hydro Turbine Governor Model

주파수추종 운전 적용을 위한 BESS의 운용 방법 및 효과

수력발전기의 속도조정율은 3~4%의 값을 일반적으로 갖는다. 국내 수력발전기 전체 설비의 용량을 가중치로 사용한 가중평균 속도조정율은 약 3.42%로 이를 속도조정율(R<sub>p</sub>)에 반영하였다. 수력발전기 모델에서 사용된 변수들은 표 2에 정리하였다.

표 2 수력발전 조속기 모델 변수  
Table 2 Hydro Turbine Governor Model Parameters

R <sub>p</sub>	R <sub>T</sub>	시정수(Time Constants)		
		조속기(T <sub>R</sub> )	서보(T <sub>C</sub> )	물(T <sub>W</sub> )
0.0342	0.5	6	0.5	2

가스터빈의 조속기 모델은 그림 3에 나타낸 것과 같이 PSSE의 GAST 모델을 사용하였다. T1은 valve controller의 시정수를 나타내고 T2는 연소챔버의 시정수를, T3은 배기가스 측정 시스템의 시정수를 나타낸다[11]. 가스터빈 조속기의 변수들은 표 3에 정리하였다.

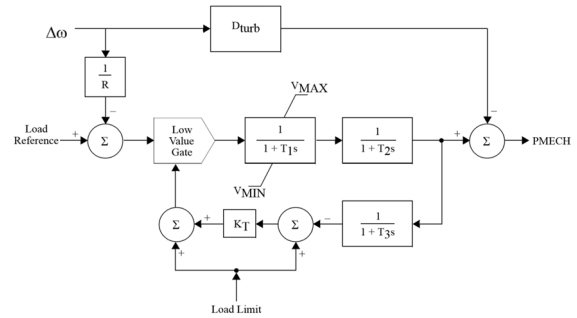


그림 3 가스터빈 조속기 모델  
Fig. 3 Gas Turbine Governor Model(GAST)

표 3 가스터빈 조속기 모델 변수  
Table 3 Gas Turbine Governor Model Parameters

R	T1	T2	T3	Load Limit	K <sub>T</sub>	V <sub>MAX</sub>	V <sub>MIN</sub>	D <sub>turb</sub>
0.045	0.4	0.1	3	0.9	2	1	0	0

2.2 BESS(Battery Energy Storage System) 모델

주파수 추종운전을 수행하는 BESS의 모델은 아래의 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 속도조정율(R<sub>BESS</sub>)에 의해 주파수 응답량이 결정되고 시정수(T<sub>BESS</sub>)에 의해 출력이 지연된다. 마지막으로 설비의 용량을 고려하여 출력이 제한되어지는 구조를 갖고 있다.

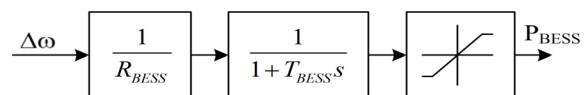


그림 4 주파수 추종운전 BESS 모델  
Fig. 4 G/F Operation BESS Model

앞서 언급한 기력, 가스, 수력 발전기들의 속도조정율은 일반적으로 3~6%의 범위 내에서 설정된다. 속도조정율은 아래의 수식 (1)과 같이 정의된다. 이는 주파수변동이 3~6%가 되어야 발전기의 출력이 100%변동한다는 의미이다. 즉, 60Hz 기준으로 주파수 변동이 1.8~3.6Hz가 일어나야 출력의 100%가 변동한다.

$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta f$  : 주파수 변동율(60Hz기준)  
 $\Delta P$  : 발전기 출력변동(정격출력기준)

국내 전력계통의 주파수 관리 범위는  $60 \pm 0.2\text{Hz}$ 이다. 여기서 0.2Hz는 60Hz의 약 0.33%이다. 예를 들어 속도조정율이 3.3%인 수력발전기는 주파수가 60Hz에서 0.2Hz 하락하여 59.8Hz로 감소하여도 주파수 변동 출력은 정격 용량의 약 10%가 된다. 속도조정율이 6.6%인 경우는 0.2Hz 하락시 주파수추종운전 출력이 정격 용량의 약 5%가 된다.

기존의 발전기들은 부하에 전력을 공급하면서 주파수 변동에 의해 출력을 조정해야한다. 그러므로 발전기의 출력이 정격 용량의 약 95% 정도를 유지하면서 주파수 변동에 따라서 조속기의 제어에 의해 나머지의 5% 출력을 조정한다. 그러나 BESS는 부하 공급의 목적이 아니고 오직 순수하게 주파수 추종운전만을 목적으로 하기 때문에 본 논문에서는 주파수가 관리범위를 벗어나기 전에 정격 출력의 100%로 주파수 추종운전을 동작하는 것으로 가정하였다. 따라서 본 논문에서는 속도조정율을 0.167%, 0.25%, 0.333%로 가정하여 모의 하였다. 이는 주파수가  $\pm 0.1\text{Hz}$ ,  $\pm 0.15\text{Hz}$ ,  $\pm 0.2\text{Hz}$  변동하면 정격 출력의 100%로 변동하는 수치이다. 그림 5는 속도조정율과 주파수에 따른 주파수 변동 출력을 나타내고 있다.

BESS의 응답속도는 기본적으로 PCS가 16ms이내에서 응답하고 배터리가 5~10ms이내에 응답하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 주파수 조정을 위한 BESS의 응답지연은 연산 처리와 입력 신호에 계측, 그리고 장치들 간의 통신 시간에 따라서 결정된다.

그림 4의 BESS 모델에서 배터리 응답 지연 시정수( $T_{\text{BESS}}$ )는 200ms, 400ms, 800ms의 출력 지연이 이루어지도록 설정하였다.

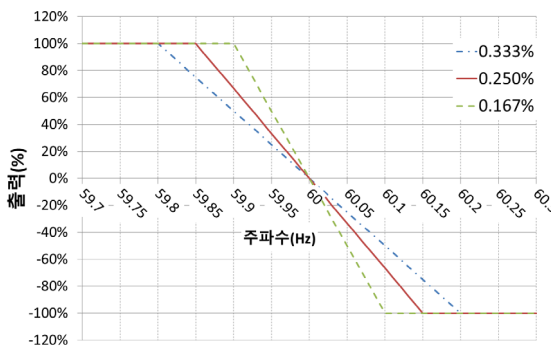


그림 5 BESS 속도조정율에 따른 주파수 변동 출력  
 Fig. 5 G/F Output of BESS by Speed Regulation Rate

이는 제주 조천변전소에서 실증된 BESS의 출력 지연 수준이다.

### 2.3 전력 계통 모델

전력계통의 BESS에 의한 주파수 추종운전에 대한 효과를 검토하기 위해 그림 6과 같이 발전기 관성(Inertia)과 부하 댐핑 (Load Damping) 전달함수에 그림 1~4에 나타난 기력, 가스, 수력, BESS의 조속기 모델을 연결하여 주파수 해석을 위한 모델을 MATLAB에서 구현하였다.

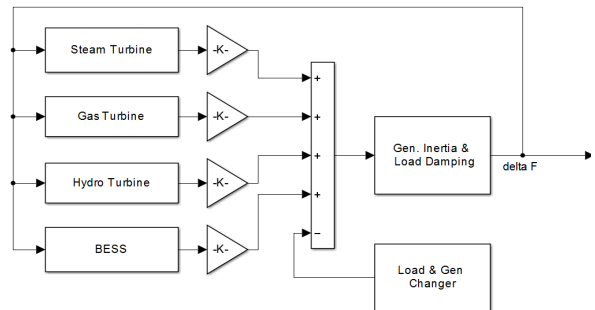


그림 6 주파수 해석을 위한 계통 모델  
 Fig. 6 Power System Model for Frequency analysis

계통의 관성 정수는 표 4에 나타난 것과 같이 첨두부하 시간대와 비첨두부하 시간대를 고려하여 설정하였다. 발전기의 관성 정수는 1,000MVA기준으로 환산한 값이고 부하댐핑 상수는 1로 1%의 주파수 변화에 의해 1%의 부하가 반응하는 것으로 가정하였다.

표 4 계통 모델 변수

Table 4 Power System Model Parameters

구 분	발전기 출력 (MW)	발전기 Inertia(H) (MWs/MVA)	주파수조정 예비력 (MW)	비고
비첨두 부하시 Off-Peak	원자력	20,716	135.6	4시
	기력	20,260	86.6	
	가스	5,435	29.6	
	수력	0	0	
합계	46,411	251.8	1,500	
첨두 부하시 Peak	원자력	20,716	135.6	14시
	기력	22,117	94.6	
	가스	15,684	85.4	
	수력	2,662	0	
합계	61,179	315.6	1,500	

주파수 조정 예비력은 기력발전기 현재 출력을 95%로 가정하여 나머지 5%에 해당하는 용량을 할당하였고 가스와 수력의 주

파수 조정 예비력은 확보해야 하는 1,500MW에서 기력발전기의 주파수 조정 예비력을 제외한 값을 할당하였다.

### 3. 사례연구

현재 BESS를 활용한 주파수 조정은 기력(석탄화력) 발전기의 주파수 조정 기능을 대체하는 것이 가장 경제적인 활용 방안으로 분석되고 있다. 이는 석탄화력 발전기의 발전 단가가 가스(복합발전) 등에 비해 상대적으로 낮기 때문에 석탄화력 발전기를 100% 출력으로 운전하고 석탄화력 발전기의 주파수 조정 기능을 BESS가 대체하는 것이 가장 적합한 활용 방안으로 검토되고 있다 [12].

#### 3.1 사례 1: 기력발전 주파수 조정 예비력 250MW 대체

BESS를 활용한 주파수 추종운전의 효과를 분석하기 위해 표 4에 정리한 첨두부하시와 비첨두부하시의 상황에서 1,000MW 발전기 탈락시의 주파수 분석을 시행하였다. 그림 7과 8일 각각 비첨두부하시와 첨두부하시의 주파수와 각각의 발전기들의 주파수 응답 출력을 나타내고 있다. 그림 7은 비첨두부하시의 1,000MW 사고시 주파수 하락을 나타내고 있으며 주파수는 최저 59.81Hz까지 하락하였다. 이때 기력 발전기와 가스터빈의 주파수 추종 응답 출력을 그림 7의 하부에 나타내었다. 가스터빈의 주파수 응답 출력은 사고 후 초기 5초 동안은 기력발전기의 주파수 응답 출력과 유사하게 나타났다. 가스터빈의 속도조절율이 기력에 비해 낮고 시정수도 작아 기력에 비해 빠른 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 그림 8은 첨두부하시의 상정사고 모의에 대한 주파수와 발전기 응답 출력을 나타내고 있다. 첨두부하시에는 수력발전이 포함되어 운영되는 것을 모의 하였다. 사고 시 주파수는 최저 59.824Hz까지 하락하였다. 비첨두부하시 보다 주파수하락이 적은 이유는 첨두부하시에는 운영중인 발전기가 많아 계통의 관성이 증가되었기 때문으로 판단된다.

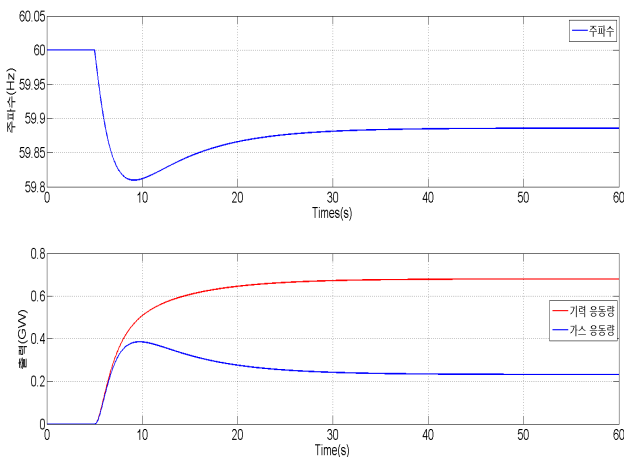


그림 7 상정사고시 주파수와 발전기 출력(비첨두부하)  
Fig. 7 Frequency and output during contingency(off peak)

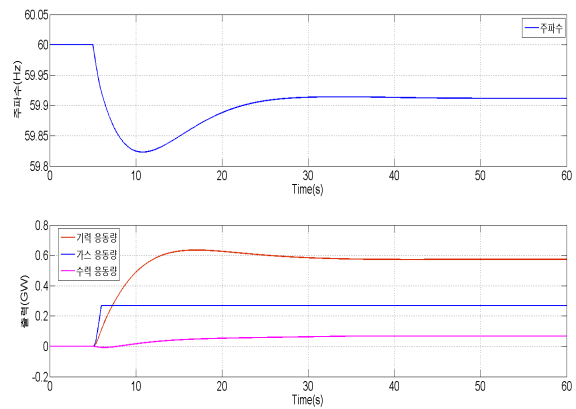


그림 8 상정사고 시 주파수와 발전기 응답 출력(피크)  
Fig. 8 Frequency and output during contingency(peak)

또한 앞서 언급한 상황에서 기력발전기 5,000MW의 주파수 조정 예비력에 해당하는 250MW의 주파수 조정예비력을 BESS로 대체하였을 경우의 주파수도 분석하였다.

BESS를 활용한 주파수 추종운전의 분석에서 앞서 언급한 BESS의 속도 조절율을 0.167%, 0.25%, 0.333%로 변경하며 분석하였고 BESS의 응답속도도 200ms, 400ms, 800ms로 변경하며 분석하였다.

그림 9과 10은 비첨두부하시와 첨두부하시의 분석 결과를 나타내고 있다. 그림 9에서 Base case는 그림 7의 상황과 동일하게 주파수 조정 예비력은 표 4의 조건으로 분석한 결과이고 이때 주파수는 최저 59.81Hz까지 감소한 뒤 주파수 추종 응답에 의하여 약 59.88Hz로 회복 되었다. 주파수 조정예비력 250MW 감소 case는 발전기의 출력은 표 4와 동일하게 가정하고 기력발전기의 주파수 조정예비력에서 250MW가 감소된 조건에서 분석되었다. 이때 주파수는 59.79Hz까지 하락후 59.86Hz로 회복되었다. 여기에 250MW BESS를 구성하여 주파수 분석을 시행을 한 결과 속도조절율에 따라서 59.83~59.84Hz로 사고 시 최저 주파수가 개선되었다. BESS 설치 전후로 최저주파수는 0.05Hz(59.79Hz→59.84Hz)개선된 것을 확인 할 수 있다. 기력발전기 예비력 250MW를 BESS로 대체한 후의 최저 주파수 변화는 0.03Hz(59.81Hz→59.84Hz) 개선된 것을 확인 할 수 있다. 이는 동일한 주파수 추종 예비력의 조건에서 BESS가 기력발전기 보다 높은 효과를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 속도조절율이 0.1667%와 0.25%인 BESS는 주파수가 각각 59.9Hz와 59.85Hz 아래로 떨어지면 정격출력을 발생하므로 사고시 최저 주파수는 동일하게 59.84Hz로 나타났다. 그러나 회복되는 주파수는 속도조절율이 0.1667%인 BESS가 더 높게 나타났다. 이는 속도조절율이 0.25%인 BESS는 주파수가 59.85Hz이상으로 회복되면 BESS의 출력이 그림 5에 나타난 것과 같이 감소하기 때문이다.

그림 10에서도 그림 9과 동일한 현상을 확인 할 수 있다. BESS의 속도조절율은 효과적인 측면에서 모의에서 적용된 3개의 수치 중 0.1667%일때 가장 효과가 높게 나타났다. 또한 속도조절율을 0.1667%보다 낮게 하면 주파수 변동시 BESS가 보다 급

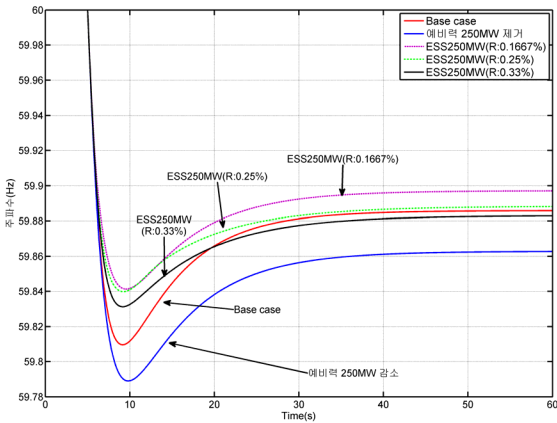


그림 9 비첨두부하시 기력 대체 BESS 응동 주파수 분석  
 Fig. 9 Frequency after Replacing ST with BESS(Off-Peak)

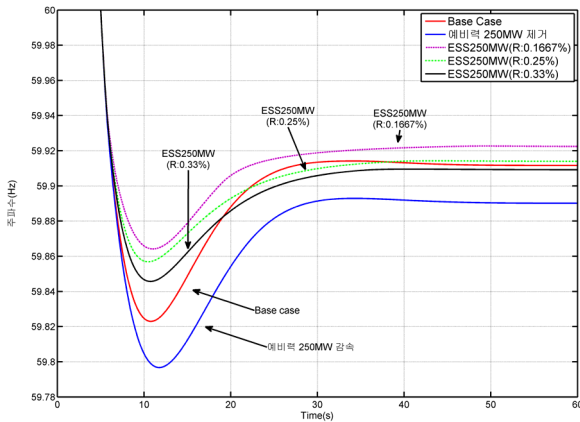


그림 10 첨두부하시 기력 대체 BESS 응동 주파수 분석  
 Fig. 10 Frequency after Replacing ST with BESS(Peak)

격하게 출력을 증가하여 주파수 유지 효과는 높게 나타날 것으로 판단되나 최적의 속도 조정율을 도출하기 위해서는 동작 빈도와 총 방전 출력 등을 고려하여 추가적인 많은 분석이 필요 할 것이다.

그림 11은 비 첨두부하시 주파수 분석에서 BESS의 응답속도의 차이로 인한 영향을 나타내고 있다. 속도조정율은 모두 0.1667%로 동일하고 그림 4의 BESS 모델에서 TBESS를 조정하여 단위 unit 입력 시 정격 출력이 각각 200ms, 400ms, 800ms 지연 뒤에 발생하도록 하였다. 주파수가 하락하는 상황에서는 BESS의 응답속도가 빠를수록 주파수의 하락이 미세하게 지연되는 것을 볼 수 있다. 주파수가 회복되는 상황에서는 BESS는 이미 정격출력을 발생하고 있어 응답속도에 의한 주파수 변동의 차이를 확인하기 힘들다. 그림 9,10에서 속도조정율의 차이에 의한 주파수 변동에 대한 영향과 비교하면 BESS의 수백ms의 응답시간 차이는 주파수 변동에 큰 영향을 미치지 않음을 확인 할 수 있다.

전력거래소의 2013년 주파수 분석에 따르면 주파수가 59.9Hz 이하로 내려간 횟수는 18회 이고 60.1Hz이상으로 상승한 횟수는

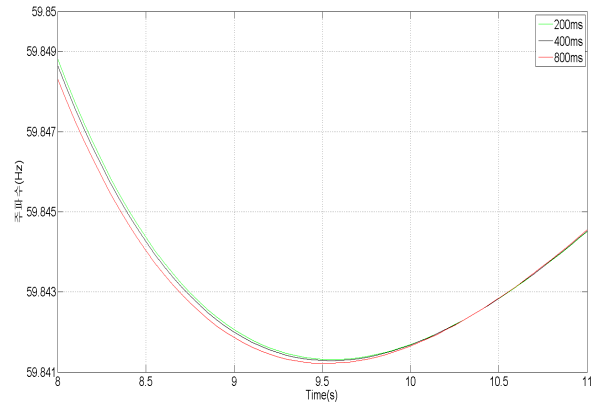


그림 11 BESS 응답속도에 따른 주파수  
 Fig. 11 Frequency on different BESS Response Time

9회로 속도조정율을 0.1667%로 설정하였을 때 정격출력의 100% 출력으로 운전하게 되는 횟수는 연간 27회로 추정된다[3].

### 3.2 사례 2: 기력발전 동일 최저주파수 BESS 응동량

앞서 사례 1에서 분석한 결과에서 알 수 있듯이 동일한 용량으로 기력발전기의 주파수 조정 예비력을 BESS로 대체한 경우 상정 사고 시 최저 주파수를 고려할 때 BESS의 주파수 조정 효과가 기력에 비해 우수한 것을 확인하였다. 따라서 이번 분석 사례는 기력발전기 5000MW의 주파수 조정 예비력인 250MW와 동일한 효과를 갖는 BESS의 용량을 반복적인 시뮬레이션을 통하여 도출하였다. 모든 BESS의 속도조정율은 0.1667%로 설정하였고 응답속도는 200ms를 적용하였다.

그림 12는 비첨두부하시에 그림 7의 주파수와 동일한 base case에서 250MW의 기력발전기의 주파수 조정 예비력을 50MW ~ 250MW BESS로 대체하였을 경우의 주파수를 함께 나타내고

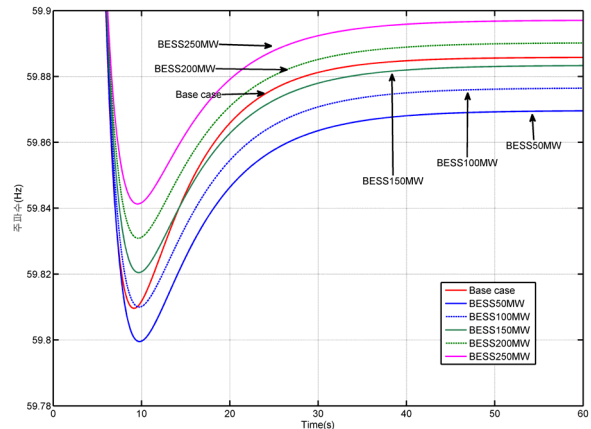


그림 12 기력 대체 BESS 응동량에 따른 주파수(off peak)  
 Fig. 12 Frequency on different exchanged BESS  
 Frequency Response capacity(off peak)



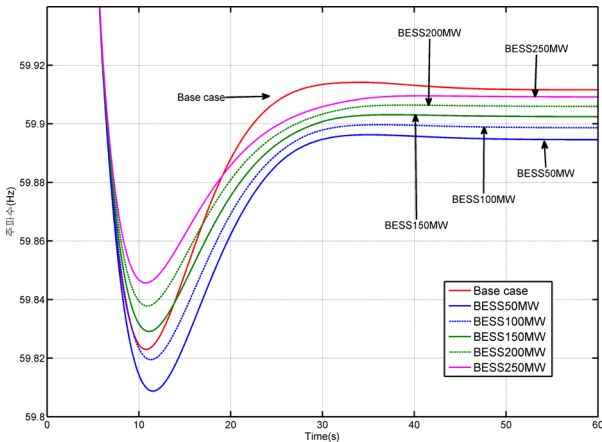


그림 13 기력 대체 BESS 응답량에 따른 주파수(peak)  
 Fig. 13 Frequency on different exchanged BESS  
 Frequency Response capacity(peak)

있다. 100MW의 BESS로 250MW의 기력발전기 주파수 응답 예비력을 대체한 경우 사고시 최저 주파수는 59.81Hz로 동일하게 나타났다. 주파수 추종운전(G/F)은 사고 시 급속한 주파수의 변동에 대응하여 주파수를 1차적으로 회복하고 자동발전제어(AGC)에 의해 주파수가 회복되도록 하는 것이기 때문에 최저주파수의 유지 측면에서는 100MW의 BESS가 250MW의 기력발전기의 주파수 조정 예비력과 동일한 효과를 얻는 것으로 볼 수 있다. 또한 200MW의 BESS에 의해 1차적으로 회복된 주파수를 보면 기력발전기를 포함한 Base case에서 회복된 주파수 보다 높은 주파수로 회복된 것을 볼 수 있다.

그림 13은 그림 12의 분석과 동일한 방법으로 진행된 것이며 다만 발전기의 구성을 첨부하지를 반영한 것이다. 사고시 최저 주파수의 경우만을 고려하면 150MW BESS의 응답시에는 최저 주파수가 59.83Hz로 250MW의 기력발전기를 포함한 Base case의 59.824Hz보다 높은 주파수로 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한 주파수 추종운전에 의해 회복된 주파수를 보면 Base case에서는 59.115Hz로 수렴하였으나 250MW의 BESS로 운전한 결과 59.909Hz로 base case 보다 다소 낮은 값으로 수렴되었다. 이는 BESS의 속도조절율이 60Hz에서 0.1Hz이상 벗어나면 정격출력으로 반응하고 그 이하의 주파수 변동에서는 그림 5에 나타난 것과 같이 주파수변화에 비례하여 응답하기 때문이다. 그림 12와 13에서 약 10초 부근에서 발생하는 사고시 최저주파수는 주파수 추종(G/F)운전에 의해서 억제되고 1차적으로 회복된다. 이때의 최저 주파수의 관점에서만 보면 BESS는 기력발전기의 주파수 조정 예비력의 40~60%의 용량으로도 동일한 효과를 얻을 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기력발전기와 가스터빈, 수력발전기의 조속기의 모델을 포함한 계통의 주파수 분석을 위한 dynamic model을 구성하여 분석하였다. 또한 주파수 추종운전을 위한 BESS의 모델

을 정의하고 속도조절율과 응답속도의 주파수 조정 효과의 영향을 살펴보았다. 본 논문의 분석결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다. 첫째, 주파수 추종운전에서 BESS의 주파수 조정 효과는 속도조절율에 큰영향을 받는다. 계통의 주파수 유지범위는  $60 \pm 0.2\text{Hz}$ 이나 전력거래소의 자체 유지 관리 범위는  $60 \pm 0.1\text{Hz}$ 로 0.1Hz이상의 주파수 변동에서 정격 출력을 발생하는 0.1667% 이하의 속도조절율이 적합할 것으로 판단된다. 적정 속도조절율을 도출하기 위해 BESS의 주파수 추종운전 횟수 등을 함께 고려해야 할 것이다. 이는 향후 전력거래 시장에서 BESS에 의한 주파수 조정 보조서비스의 정산 규정에 의하여 큰 영향을 받을 것이다. 둘째 상정 사고 시 최저 주파수를 동일한 수준으로 유지하기 위해서는 250MW의 기력발전기의 주파수 조정 예비력의 40~60%에 해당하는 100~150MW의 BESS로도 동일한 효과를 얻을 수 있다. 이는 향후 기력발전기의 주파수 조정 기능을 동일한 용량으로 BESS가 대체하면 계통의 주파수 유지 능력이 현재보다 향상될 것으로 기대된다.

이러한 BESS의 우수한 주파수 조정 기능을 효율적으로 계통에 적용하기 위한 다양한 연구가 계속적으로 수행될 것이다.

#### References

- [1] S. M. Cho, "Optimal BESS Sizing for Customer using New Model Considering Efficiency and Life Cycle", Ph. D Dissertation, 2012.
- [2] S. M. Cho, H. S. Shin and J. C. Kim, "Modeling of Battery Energy Storage System at Substation for Load Leveling and Its Economic Evaluation", The Trans. on The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 7, 2012.
- [3] J. Y Kim, D. H. Lee, K. W. Cho, S. I. Moon, "Statistic Anaysis based on the frequency Control Performance Standard for introducing Grid Scale BESS in korea Power System", KIEE Power Engineering Society Spring Conference, April 18-19 2014.
- [4] "KEPCO ESS Installation for Implement Creative Economic", Electric Power, Nov. 2013.
- [5] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [6] Korea Power Exchange, "Electric Power Market Operation Manuel", 2013, 10
- [7] P. Mackin, R. Daschmans, B. Williams, B. Haney, R. Hunt, J. Ellis, "Dynamic Simulation Studies of the Frequency Response of the Three U.S. Interconnections with Increased Wind Generation", Lawrence Berkeley National Lab. Dec 2010.
- [8] T. Sasaki, T. Kadoya, K. Enomoto, "Study on Load

Frequency Control Using Redox Flow Battery," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 19, No. 1, pp. 660-667, Feb. 2004.

[9] A. Oudalov, D Chartouni and C Ohler, "Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control", IEEE Trans. on Power System, Vol. 22, No. 3, August 2007.

[10] Siemens Energy, "PSSE Model library", Oct. 2010.

[11] B. M. A. P. Pedro, "Dynamic Simulations in Realistic Size Networks", Institute superior technique, 2010

[12] 문승일, "계통연계형 대용량 에너지 저장장치(ESS)의 활용 방안 및 경제성 평가", 전기저널 제442호, Oct. 2013

저 자 소 개



조 성 민(Sung-Min Cho)

1980년 10월 03일생. 2003년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 박사 졸업. 현재 한전 전력연구원 ESS연구사업단 선임연구원

TEL : 042-865-5968

E-mail : chosmin@kepco.co.kr



장 병 훈(Byung-Hoon Jang)

1964년 3월 21일생. 1989년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원전기 공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한전 전력연구원 ESS연구사업단 책임연구원

Tel : 042-865-5820

E-mail : jang7@kepco.co.kr



윤 용 범(Yong-Bum Yoon)

1958년 9월 28일생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 동 대학원 전 졸업(박사), 현재 한전 전력연구원 ESS연구사업단 단장

E-mail : yunybon@kepco.co.kr



전 응 재(Woong-jae Jeon)

1979년 3월 31일생. 2005년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 ESS연구사업단 선임보연구원



김 철 우(Chulwoo Kim)

1979년 11월 04일생. 2006년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 ESS연구사업단 선임보연구원