

국내 계통 최대부하변동에 대한 BESS 및 조속기 특성 비교 분석

Comparative Analysis of BESS and Governor Responses for Maximum Load Variations in Korea Power System

강 한 구* · 전 영 환†
(Han-Gu Kang · Yeong-Han Chun)

Abstract - The government established the 8th national energy plan that electricity energy from renewables in 2030 will be 20%. The frequency stability problem is one of the key issues to overcome for accomplishing the energy plan. Frequency quality deteriorates due to short term variations of renewables output. Battery energy storage system(BESS) is considered as a good alternative to improve the frequency quality due to its quick response. In this paper, we examined the effectiveness of BESS against the conventional governor properties.

Key Words : Battery energy storage system, Governor, Frequency regulation, Frequency stability

1. 서 론

국내 계통에서 원자력발전은 기저발전으로서 전력공급에 주요한 역할을 담당해왔다. 그러나 현재 우리나라의 원자력발전기는 조속기 운전을 하고 있지 않기 때문에 발전기 탈락 및 부하급변 등에 의한 수급 불균형 발생 시 주파수조정에비력을 공급할 수 없다. 원자력발전의 점유율이 높은 상태에서 신재생에너지원의 발전량 비중이 높아지면 주파수의 품질이 급격하게 떨어지게 된다. 신재생에너지원은 관성 특성을 가지는 기존의 발전기를 대신하기 때문에 계통의 관성이 줄어들게 되고, 주파수 제어에 참여하는 발전기 수도 제한되기 때문이다.

2017년 연말에 발표한 제8차 전력수급기본계획에서는 2030년 신재생에너지 점유율을 20%로 확대하고 원자력 발전을 감축하는 내용을 담고 있다. 그러나, 원자력 발전을 추가건설하지 않고 수명연장을 하지 않는다고 하더라도 2030년에 원자력발전 설비용량은 여전히 20,000MW 이상을 유지하게 된다.[1] 우리나라의 경우 전원믹스에서 원자력발전기 비율이 높기 때문에 다른 나라에 비해 주파수 품질을 유지하기 어렵게 된다.

이와 같은 상황에서 BESS는 기존에 주파수조정에비력을 공급해오고 일반 발전기에 비하여 빠른 제어응답 특성을 가지기 때문에 계통의 주파수 안정성 향상을 위한 방안으로 주목받고 있다. 이러한 이유로 BESS를 주파수조정용 전원으로 활용하기 위하여 BESS 운전 방안 및 알고리즘 개발에 대한 연구도 다각적으로 진

행되고 있다.[2-6] 이와 더불어 BESS의 주파수조정용 전원 활용의 가치를 평가하는 연구는 계통상황에 따른 BESS 운영방안 및 제어 알고리즘 연구에 다양한 기여를 할 것으로 예상된다.

본 논문에서는 기존 유동성발전기의 주파수조정에비력을 대체로 BESS를 투입하여 BESS의 상대적인 주파수추종운전 능력을 평가하기 위한 연구를 진행하였다.

2. 본 론

2.1 BESS

신재생에너지원의 발전량 비중 증가는 출력의 간헐성과 변동성으로 계통의 주파수 안정성을 저하시키는 문제를 발생시킬 수 있다. 때문에 신재생에너지원의 출력 변동에 따라 발생하는 주파수 변화에 빠르게 대응하여 계통의 수급균형을 유지할 수 있는 방안이 필요한데 BESS는 이와 같은 상황의 문제를 해결할 수 있는 전원으로 매우 적합하다.

BESS는 주파수 응답 특성이 빠르기 때문에 신재생에너지원의 변동성이나 부하급변으로 인한 수급 불균형 계통에 빠르게 출력을 제공하여 계통의 안정성 향상에 긍정적인 기여를 할 수 있다. 또한 BESS는 설비용량 대비 예비력활용도가 매우 높다는 장점이 있다. 기존 국내 계통은 기력발전기, 수력발전기 등 주파수추종운전이 가능한 유동성발전기의 조속기를 통하여 출력을 조절해 계통주파수를 제어해왔다. 그러나 앞서 말한 발전기는 주파수조정 예비력이 설비용량의 5% 수준이나 BESS의 경우 설비용량의 100%까지 예비력으로 활용할 수 있다는 장점이 있다.

BESS는 계통의 주파수 안정성에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 경제적으로도 긍정적인 기여를 할 수 있다. 국내 계통의 화력발전

† Corresponding Author : Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Korea.
E-mail : yhchun@hongik.ac.kr

* Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Korea.

Received : December 18, 2017; Accepted : January 23, 2018

기는 예비력 확보를 목적으로 감발운전을 진행하고 있으며 감발 운전에 해당하는 용량만큼 LNG 등의 고원가 발전기를 추가적으로 가동하고 있다. 그러나 BESS를 주파수조정을 전원으로 활용하게 될 경우, 고원가 발전기를 감발운전하고 그 용량만큼 저원가인 화력발전기를 상향운전하여 경제적인 이득을 얻을 수 있다.

위와 같은 장점으로 현재 우리나라는 2014년 서안성 변전소 28MW와 신용인 변전소 24MW를 시작으로 BESS 설비 확대를 위한 지속적인 노력을 기울이고 있다. 2017년 11월 기준 국내에는 총 376MW의 BESS를 구축한 상태이다.

표 1 국내 주파수조정용 BESS 용량

Table 1 Domestic Capacity of Frequency Regulation BESS

상업운전 년도	장 소	용 량 [MW]	총 합 [MW]
2015	서안성	28	52
	신용인	24	
2016	신계룡	24	164
	신김제	24	
	신화순	24	
	울주	24	
	의령	24	
	경산	48	
	신충주	16	
2017	논공	36	140
	울산	32	
	속초	24	
	김제	48	
합 계			376

2.2 시뮬레이션 모델링

2.2.1 주파수 시뮬레이션

본 논문에서는 수급 불균형에 따른 계통의 주파수 변화를 시뮬레이션 할 수 있도록 모델링을 진행하였다. 주파수 변화는 스윙방정식을 모델링하여 부하급변 시 터빈의 전기적 토크와 기계적 토크의 차이로 발생하는 주파수 변화를 나타내었다.

$$J \frac{d\omega_s}{dt} = T_a = T_m - T_e \tag{1}$$

여기서 T_a [N·m]는 가속 토크, T_m 은 기계적 토크, T_e 는 전기적 토크이다. 토크와 에너지의 관계는 다음과 같다.

$$P = \omega T \tag{2}$$

식 (2)와 식 (3)에 따라 식 (1)을 변환하면 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.[6]

$$H = \frac{1}{2} J \frac{\omega_s^2}{S_{rate}} \tag{3}$$

$$2H \frac{d\omega_s}{dt} = \frac{T_a}{S_{rate}/\omega_s^0} = \frac{T_m - T_e}{S_{rate}/\omega_s^0} = \frac{1}{\omega_s/\omega_s^0} \frac{P_m - P_e}{S_{rate}} \tag{4}$$

$$= \frac{1}{\omega_s} (\overline{P}_m - \overline{P}_e)$$

$$\overline{\omega}_s = \frac{\omega_s}{\omega_s^0}, \overline{P}_m = \frac{P_m}{S_{rate}}, \overline{P}_e = \frac{P_e}{S_{rate}}$$

J : 회전자의 관성 모멘트 [$kg \cdot m^2$]
 S_{rate} : 발전기 정격용량 [VA]
 ω_s : 동기회전속도 [rad/sec]
 H : 계통의 관성정수 [sec]

2.2.2 발전기 및 부하 모델링

본 시뮬레이션의 부하 모델링은 주파수 변화에 따라 변하는 전동기 부하를 고려하였다. 국내계통 부하의 경우 전동기로 구성된 산업부하가 많은 비중을 차지하기 때문에 주파수 변화에 따른 영향을 모델링할 필요가 있다. 주파수 변화에 따른 부하의 변화는 아래와 같이 모델링할 수 있다. 여기서 $\Delta P_{L(freq)}$ 는 주파수 변화에 따라 변하는 부하, ΔP_L 는 주파수 변화에 영향을 받지 않는 부하를 의미한다. 부하정수 D는 국내 계통 상황을 고려하여 대푯값 2로 선정하였다.[8]

$$\Delta P_e = \Delta P_L + \Delta P_{L(freq)} \tag{5}$$

$$\Delta P_{L(freq)} = D \Delta w \tag{6}$$

발전기의 출력제어는 조속기의 밸브제어를 통해 일어나기 때문에 발전원 별 조속기 모델링을 진행하였다. 조속기 모델은 계통해석 프로그램인 PSS/E의 터빈-조속기 모델 데이터를 활용하였다.[9] 발전원은 원자력발전기, 유동성발전기(IEEEG1), BESS로 총 3개의 모델링을 구성하였다.

국내 전력계통의 주파수유지기준은 60 ± 0.2 Hz이다.[10] 이를 고려하여 주파수 0.2Hz 하락 시, 유동성발전기가 주파수조정예비력을 모두 출력할 수 있도록 유동성발전기의 발전기 정수를 15로 설정하였다. 이는 유동성발전기가 설비용량의 95%를 실시간 출력으로 유지하고 나머지 5%를 주파수추종운전하기 때문이다.

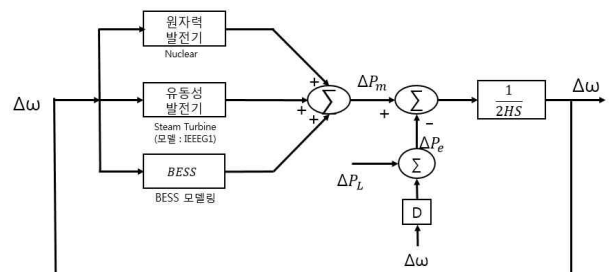


그림 1 주파수 시뮬레이션 Block Diagram
 Fig. 1 Frequency Simulation Block Diagram

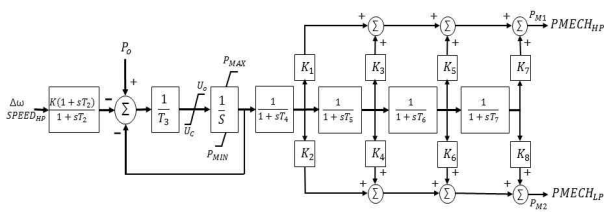


그림 2 PSS/E IEEE1 Governor 모델
Fig. 2 PSS/E IEEE1 Governor Model

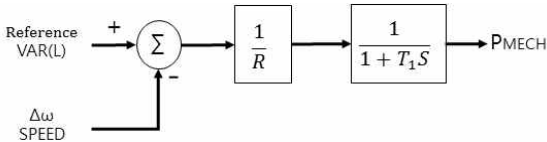


그림 3 BESS 주파수 제어모델
Fig. 3 BESS Frequency Control Model

BESS의 경우는 주파수 0.2Hz 하락 시 설비용량의 100%를 주파수조정에비력으로 응동하는 것을 목적으로 하기 때문에 본 논문의 BESS 발전기 정수는 300으로 설정하였다.

2.3 사례연구

국내 계통은 주파수조정에비력으로 1,500MW 이상을 실시간으로 확보하여 운영하고 있다.[9] 이를 고려하여 본 논문에서는 전력수급 불균형 시, 유동성발전기의 주파수조정에비력 1,500MW에 BESS를 추가 구성했을 때 유동성발전기의 주파수조정에비력 1,550MW인 경우와 동일한 최저주파수를 갖는 BESS 용량을 산정하였다. BESS의 빠른 주파수종응운전 능력의 가치를 평가하기 위하여 동일한 최저주파수를 갖는 것을 조건으로 설정하였고 산정된 BESS 용량과 유동성발전기 50MW를 비교하여 BESS의 주파수조정에비력 활용 가치를 확인하였다.

2.3.1 전원구성 및 부하량 산정

전원구성은 앞서 언급하였듯이 원자력발전기, 유동성발전기 그리고 BESS로 구성된다. 원자력발전기의 설비용량은 20,530MW로 설정하였다. 국내 2017년 11월 기준 원자력발전기의 설비용량이 22,530MW인 점을 고려하였고 원자력발전기가 18개월을 주기로 2개월간 계획예방정비를 진행하기 때문에 이를 감안하여 원자력발전기 2기를 계통 투입에서 제외하였다. 원자력발전기 1기당 1,000MW, 총 2,000MW가 계획예방정비 중인 것으로 가정하였다. 원자력발전을 제외한 나머지 부하는 유동성발전이 담당하는 것으로 설정하였다.

계통부하는 50,000MW, 52,500MW, 55,000MW, 57,500MW, 60,000MW 총 5개 경우를 고려하였다. 다양한 계통부하를 고려한 시뮬레이션을 통해 계통부하의 변동이 BESS의 주파수조정에비력 용량에 미치는 영향을 검토하였다. 계통부하 중 최소부하를

50,000MW로 선정한 것은 주파수조정에비력과 원자력발전기의 설비용량을 고려하였다. 주파수조정에비력이 유동성발전기 설비용량의 5%인 점을 감안하였을 때 유동성발전기가 1,550MW의 주파수조정 예비력을 공급하기 위해 최소 31,000MW의 설비용량이 확보되어있어야 한다. 유동성발전기와 원자력발전기의 발전량만으로 49,980MW 이므로 최소 부하량을 50,000MW로 설정하였다.

2.3.2 제철부하 변동성

제철부하는 다른 업종의 부하와는 다르게 변동성 및 변동량이 매우 큰 부하이다. 제철분야는 공정에 압연 모터 등 대용량의 부하를 단속적으로 운전하기 때문에 소비하는 전력량에 비해 매우 높은 변동성을 보인다. 실제로 제철부하의 증가와 발전기 탈락이 동시에 발생하여 계통의 안정성이 저하된 사례가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 전력수급 불균형 발생 원인을 제철부하의 변동으로 선정하였다. 제철부하의 실제데이터를 활용하여 10초 변동성을 분석하였다. 이는 일반적으로 국내 계통에서 발전기 탈락 시 주파수가 최저주파수에 도달하는데 걸리는 시간이 10초 내외인 점을 고려하였다. 제철부하 변동성 분석은 변동량에 따른 증가횟수를 검토하고 그 중 최대 변동량을 부하 변동량으로 설정하였다. 검토 결과 제철부하의 10초 최대 변동량은 830.22MW인 것으로 확인되었다.

표 2 제철부하 10초 변동량 50MW별 증가횟수

Table 2 Number of times the 50MW steel load increase for 10 seconds

변동량 [MW]	제철부하 10초 변동성	
	증가횟수	
0~50	343,047	
50~100	218,994	
100~150	89,518	
150~200	24,741	
200~250	5,034	
250~300	774	
300~350	102	
350~400	9	
400~450	1	
450~500	1	
500~550	3	
550~600	0	
600~650	1	
650~700	0	
700~750	0	
750~800	1	
800~850	2	

2.3.3 BESS 주파수조정에비력 산정

선차적으로 주파수조정에비력이 1,550MW인 경우 제철부하의 변동을 고려하여 주파수변화를 검토하였다. 이후 주파수조정에비

력 1,500MW에 BESS를 추가 구성하여 앞서 진행한 시뮬레이션과 동일한 최저주파수를 갖는 BESS의 용량을 반복적인 시뮬레이션을 통하여 산정하였다. 다음 표는 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

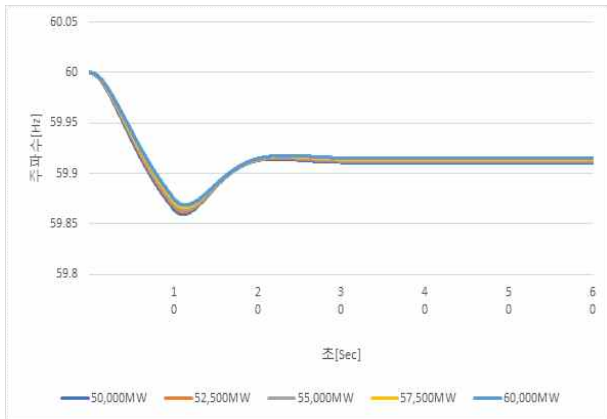


그림 4 시뮬레이션 상황별 계통주파수 변화 (1,500+BESS)
 Fig. 4 Frequency by simulation case (1,500+BESS)

표 3 조속기와 같은 최저주파수 특성을 갖는 BESS 용량
 Table 3 BESS capacity with same lowest frequency characteristic as governor

부 하 [MW]	Case [MW]	BESS [MW]	최저주파수
50,000	1,500+50	0	59.8597
	1,500+BESS	24.7	
52,500	1,500+50	0	59.8621
	1,500+BESS	24.75	
55,000	1,500+50	0	59.8644
	1,500+BESS	24.8	
57,500	1,500+50	0	59.8666
	1,500+BESS	24.85	
60,000	1,500+50	0	59.8687
	1,500+BESS	24.9	

부하 50,000MW의 경우, 유동성발전기의 1,550MW 주파수추종운전 시 최저주파수가 59.8597Hz인 것으로 나타났다. 유동성발전기의 주파수조정예비력 1,500MW에 BESS를 추가했을 때 이전과 동일한 최저주파수를 갖는 BESS의 용량은 24.7MW인 것으로 산정되었다. 부하 52,500MW의 경우는 유동성발전기의 1,550MW 주파수추종운전 시 최저주파수가 59.8621Hz인 것으로 나타났다. 유동성발전기의 주파수조정예비력 1,500MW에 BESS를 추가했을 때 59.8621Hz와 동일한 최저주파수를 갖는 BESS의 용량은 24.75MW인 것으로 산정되었다. 앞서 산정된 BESS 용량보다 0.05MW 높은 수치로 산정된 것을 확인할 수 있으며 부하가 55,000MW, 57,500MW인 경우에서도 BESS 용량은 각각 24.8MW, 24.85MW로 0.05MW 높게 산정되었다. 마지막으로 부하가 60,000MW인 경우에서도 같은 경향을 보였다. 부하

60,000MW의 경우, 유동성발전기의 1,550MW 주파수추종운전 시 최저주파수가 59.8687Hz인 것으로 나타났고 유동성발전기의 주파수조정예비력 1,500MW에 BESS를 추가했을 때 59.8687Hz와 동일한 최저주파수를 갖는 BESS의 용량은 24.9MW인 것으로 산정되었다. 부하량 50,000MW인 경우와 비교하면 0.2MW 증가된 것이다. 계통의 부하가 더욱 증가하여 70,000MW일 경우 BESS의 용량이 25MW로 산정될 것을 예측해 볼 수 있다. 이는 부하가 증가하더라도 계통에서 주파수추종운전을 할 수 있는 유동성발전기의 발전량이 증가하는 것이 아니기 때문이다. 앞서 언급했듯이 주파수조정예비력은 유동성발전기 설비용량의 5%로 주파수조정예비력이 1,550MW인 경우 주파수추종운전을 할 수 있는 발전량은 31,000MW이다. 따라서 부하가 증가함에 따라 유동성발전기의 전력이 계통에 추가 공급된다면 주파수추종운전을 할 수 있는 발전량은 증가하지 못한다. 결과적으로 부하가 증가해도 위의 경향에 따라 BESS 용량이 증가할 것이며 부하가 10,000MW 증가한 70,000MW의 경우, BESS의 용량은 25MW로 산정될 것이다.

동일한 부하 변동량을 고려했는데 부하가 증가함에 따라 BESS의 용량은 24.7MW에서 24.9MW까지 증가하여 산정되었다. 이와 같은 결과가 나온 것은 BESS의 빠른 주파수 응답 특성에 기인한다. BESS가 기존의 발전자원에 비해 높게 평가되는 것은 빠른 응답 특성으로 인한 것이다. 계통 부하가 증가하면 관성의 증가로 동일한 부하변화에 따른 주파수 변화가 상대적으로 작게 나타난다. 이는 순간적으로 계통에 투입되어야 할 추가 발전량 감소와 기존의 유동성발전기가 주파수 변화에 대응 할 시간적 여력이 발생함을 의미한다. 여력으로 인해 주파수 변화에 유동성발전기가 더 많은 발전량을 계통에 제공 할 수 있으며 BESS의 빠른 응답 특성이 갖는 가치는 낮아지게 된다. 결과적으로 부하변동 시, 기존 발전기 예비력과 동일한 최저주파수 특성을 갖는 등가의 BESS 용량이 높게 산정 되는 것이다.

시뮬레이션 결과를 검토했을 때, 유동성발전기의 50MW와 동일한 최저주파수특성을 갖는 BESS의 용량은 모든 부하에서 25MW에 근사한 수치로 산정되었다. 이를 통하여 기존 유동성발전기만의 주파수조정예비력이 공급되는 계통과 동일한 최저주파수를 갖기 위해 BESS는 유동성발전기 주파수조정예비력의 1/2 배 용량이 필요한 것으로 판단할 수 있다.

3. 결 론

BESS는 빠른 주파수추종운전 능력과 설비용량의 100%를 주파수조정예비력으로 활용할 수 있는 장점으로 전력계통의 주파수 안정성 향상을 위한 방안으로 주목받고 있다.

본 논문에서는 기존 유동성발전기의 주파수조정예비력을 대체로 BESS를 투입하여 BESS의 상대적인 주파수추종운전 능력 분석을 위한 연구를 진행하였다. 기존 유동성발전기의 주파수조정예비력과 동일한 최저주파수 특성을 갖는 BESS의 주파수조정예비력은 기존 유동성발전기 예비력의 1/2에 해당하는 것으로 확인 되었다. 이를 통해 BESS는 빠른 제어응답 특성으로 인하여 기존 유동성발전기의 주파수추종운전에 비하여 2배의 효율성을 갖는다고 평가할 수 있다.

BESS의 주파수추종운전 능력은 발전기 탈락 사고 및 부하급변 등의 계통상황에 따라 다르게 평가될 수 있다. 때문에 BESS가 활용되는 상황을 고려하여 예비력 효용성을 평가하고 그에 알맞은 BESS 활용 및 제어알고리즘 연구가 함께 필요하다. BESS의 활용도 증가는 주파수확보가 어려운 국내 계통에서 전력계통의 주파수 안정화 향상에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2015학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

- [1] Korea Power Exchange, "The 8th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand", 2017
- [2] Woo Yeong Choi, Ga Ram Yu, Kyung Soo Kook, "Operating Method of BESS for Providing AGC Frequency Control Service Considering Its Availability Maximization", The transaction of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 65. No. 7, 2016
- [3] I. Serban, C. Marinescu, "Battery energy storage system for frequency support in microgrids and with enhanced control features for uninterruptible supply of local loads", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol 54, 2014
- [4] B. Gundogdu, S. Nejad, D. T. Gladwin, D. A. Stone, "A Battery Energy Management Strategy for UK Enhanced Frequency Response", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2017
- [5] B. Gundogdu, D. T. Gladwin, D. A. Stone, "Battery SOC Management Strategy for Enhanced Frequency Response and Day-Ahead Energy Scheduling of BESS for Energy Arbitrage", Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2017
- [6] Korea Power Exchange, "Procurement of Operating Reserve Considering Characteristics of Ess for Frequency Regulation", 2017
- [7] P. Kunder, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [8] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation Operation and Control", WILEY, 1996
- [9] Siemens Energy, "Volume II : Program Operation Manual", 2005
- [10] Korea Power Exchange, "Electric Power Market Operation Manual", 2017

저 자 소 개



강 한 구 (Han-Gu Kang)

1993년 2월 4일생. 2016년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업. 2016년~현재 동 대학원 전자전기공학과 석사과정.



전 영 환 (Yeong-Han Chun)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 석사. 1985~1994년 한국전기연구원(KERI) 연구원. 1997년 일본 동경대학교 전기공학과 박사. 1998~2002년 한국전기 연구원(KERI) 그룹장. 2002~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수.