

배터리 가용성 극대화를 고려한 BESS의 AGC 주파수제어 추종운영방안

Operating Method of BESS for Providing AGC Frequency Control Service Considering Its Availability Maximization

최우영* · 유가람* · 국경수†
(Woo Yeong Choi, Ga Ram Yu, Kyung Soo Kook)

Abstract - Battery energy storage system(BESS) attract the attention of the power system operators with its fast response to a disturbance in spite of its limited energy capacity. This paper proposes the operating method of BESS for following the Automatic Generation Control(AGC) frequency control which is centrally distributed by a system operator. As BESS needs to just meet the control requirement from the system operator, it should be able to properly manage the state of charge(SOC) of BESS to be available to control signal. For doing these, the proposed method distributes the control requirement to available batteries in proportion to its SOC. In addition, unavailable batteries are controlled to recover the SOC to an appropriate range, and the recovering power is supplied by available batteries meeting the control requirement. Moreover, the proposed method manages the efficiency of power conversion system (PCS) by limiting the number of PCS to be assigned for the low control requirement. Finally, the case studies are carried out to verify the effectiveness of proposed strategy.

Key Words : Battery Energy Storage System(BESS), Automatic Generation Control(AGC), Load Frequency Control(LFC), Control strategy

1. 서 론

최근 모바일 기기 시장의 급성장과 전기자동차 보급 확대에 따라 배터리의 경제성이 빠르게 향상되면서 전력 계통에서도 배터리 기반의 전기저장장치인 BESS의 활용이 고려되고 있다. BESS는 전력 제어의 속응성과 정확성이 기존 발전원들에 비해 매우 우수한 자원으로서 전력 계통의 운영 효율 향상에 상당한 기여를 해줄 수 있을 것으로 기대된다.[1] 국내의 경우, BESS를 국가 경제의 성장 동력으로 활용하고자 BESS를 이용한 다양한 분야에서의 R&D 및 설비 투자 등 정부의 적극적인 지원이 이루어지고 있다. 특히, 한전의 창조경제 구현을 위한 ESS 종합 추진 계획에 따라 주파수 조정용으로 500MW 규모의 BESS 설치를 추진하고 있으며, 이미 2015년에 52WM 규모의 BESS가 설치되어 운영 중에 있고, 2016년에는 200MW 규모의 BESS가 추가로 설치될 예정이다.[2],[3]

주파수는 전력계통에서 가장 중요한 기능인 전력수급의 균형 유지 여부를 나타내는 파라미터로서 계통운영에서는 이러한 주파수제어를 위해 크게 관성 제어와, 조속기를 통한 1차 주파수제어

그리고 AGC를 통한 2차 주파수제어로 구분하여 운영하고 있다. 특히, 2차 주파수제어는 중앙제어로서 Energy Management System(EMS)을 기반으로 계통 운영자로부터 송출된 제어 신호를 통해 정상 상태 혹은 과도 상태 시 계통 주파수를 공칭 주파수로 회복시키기 위해 수행되는데, 중앙집중식 운영방식을 취하고 있는 대규모 전력계통에서는 이러한 2차 주파수제어의 중요성이 매우 높다고 할 수 있다. 또한, 이미 EMS의 급전 지시에 따라 에너지 공급을 수행하고 있는 기존 발전기의 경우, 2차 주파수제어에 대한 응답은 매우 중요한 발전기 성능으로 관리되고 있으며, 이때 계통 운영자로부터 발송된 2차 주파수제어 신호를 정확히 추종하는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다.

따라서 속응성과 정확성이 우수한 BESS의 경우, 2차 주파수제어 서비스를 제공하는데 매우 유리한 조건을 가지고 있어 최근, 이에 대한 다양한 연구와 실증이 이루어지고 있다.[4]-[8] 반면에, BESS는 에너지 제약 등 기존 발전기와는 상이한 특성을 지니기 때문에 BESS를 활용한 AGC 주파수제어가 전력계통에 효과적으로 기여하기 위해서는 BESS의 장·단점을 고려한 별도의 운영방안이 요구된다.

이를 위해 다수의 배터리로 구성된 BESS를 대상으로 계통의 AGC 주파수제어 신호를 보다 효과적으로 추종하는 방안을 제안한다. 이를 위해, BESS를 구성하는 다수 배터리의 개별 SOC에 따른 가용 상태 및 제어 신호의 크기에 따라 정상 제어와 회복 제어 그리고 저 전력 제어로 모드를 구분하여 AGC 주파수제어를 수행하도록 하였다. 즉, 정상 제어에서는 제어 신호의 추종을 최우선적으로 수행하며, 가용한 배터리의 SOC에 따라 제어 신호를

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Chonbuk National University, Korea
E-mail : kskook@jbnu.ac.kr

* Smart Grid Research Center, Dept. of Electrical Engineering,
Chonbuk National University, Korea

Received : April 22, 2016; Accepted : June 15, 2016

비례배분함으로써 가용 에너지가 많은 배터리의 서비스 참여를 높인다. 이때, 지령된 주파수제어 신호와 BESS 내 가용 출력을 비교하여 가용 출력이 충분할 경우에만, 비가용 배터리의 회복 제어를 수행 한다. 한편 회복 제어 모드에서는 BESS 내 가용 출력에 따라 비가용 배터리의 제어 가용성 확보를 위한 충전 또는 방전 수행토록 하였고, 저 전력 제어 모드에서는 배터리의 저 출력 시 전력변환설비의 효율 악화를 방지토록 하였다. 이를 통해 AGC 주파수제어 신호에 대한 BESS의 우수한 추종성을 유지하면서 서비스 지속을 위한 BESS의 가용성을 극대화할 수 있다.

본 논문에서는 제한된 BESS의 AGC 주파수제어 추종운영방안을 모의해석을 이용한 다양한 사례연구를 통해 분석하여 그 유효성을 확인하였다.

2. BESS의 AGC 추종 제어 고려 사항

BESS는 에너지 제약, 수명 특성 그리고 PCS의 효율 등 기존 발전원들과는 매우 상이한 특성을 지니고 있다. 이에 본 장에서는 AGC 주파수제어 및 제어 수행을 위한 BESS의 고려 사항을 검토하였다.

2.1 BESS의 AGC 주파수제어

국내 전력 시장 운영 규칙에 따르면, AGC 주파수제어는 1차 주파수제어 후 주파수 편차를 유지 범위로 회복시키기 위한 제어로서 30초 이내에 응동하여 30분간 지속 가능한 발전기의 출력 및 전기저장장치의 EMS 원격 제어 주파수 조정 용량 및 출력 조정을 의미한다.[9] 이러한 AGC 주파수제어는 관성 제어나 조속기에 의한 1차 주파수제어 등의 자체적인 제어를 수행하는 방식과는 달리 계통 운영자로부터 계통의 주파수 편차에 따라 계산된 제어 신호가 각 발전기들로 지령되기 때문에 제어 신호의 추종이 가장 중요하다. 따라서 속응성과 정확성이 우수한 BESS는 AGC 주파수제어에 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 평가받는다.

실제 미국의 PJM의 경우, BESS 및 속응 자원의 속응성을 반영하여 다음 그림과 같이 주파수의 고주파 성분을 High Pass Filter(HPF)를 통해 신호를 지령하고, 기존의 발전원에는 주파수 제어 신호의 저주파 성분을 Low Pass Filter(LPF)를 통해 신호

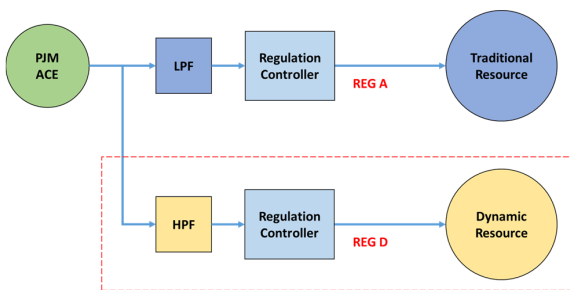


그림 1 PJM의 발전자원 별 AGC 주파수제어
Fig. 1 AGC Frequency Control in PJM

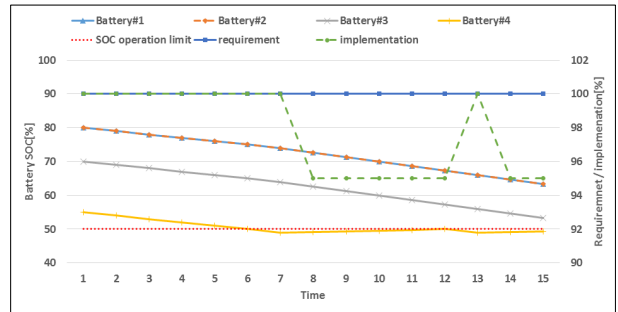


그림 2 에너지 제약에 따른 AGC 주파수제어 신호 추종 오차 예
Fig. 2 Example of LFC Error due to a limited Energy Capacity

를 지령한다. 이를 각각, Regulation D과 Regulation A로 일컫는다.[10]

이를 통해 계통에서는 BESS 등 속응 자원의 제어 효과를 극대화하고, 기존 발전원들의 주파수제어 효율을 높일 수 있다. 하지만, BESS의 경우, 기존 발전원들과는 달리 에너지 제약 등의 상이한 특성을 지니고 있기 때문에 AGC 주파수제어 수행을 위한 별도의 제어 전략이 요구된다.

2.2 제어 신호 추종

AGC 주파수제어는 중앙제어방식으로 계통 운영자로부터 발송된 신호에 대한 정확한 추종이 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 속응성이 우수한 BESS의 경우, 제어 신호의 정확한 추종은 용이하나 에너지 용량이라는 제약을 지니고 있기 때문에 배터리 별 SOC에 따라 회복제어를 수행하는 경우, BESS의 제어 신호 추종에 오차가 발생할 수 있다. 다음 그림은 이러한 회복제어 수행으로 인한 제어 신호의 추종 오차가 발생하는 사례이다.

위 그림 2에서 Battery#4의 SOC가 제어 수행에 따라 운영 범위를 벗어나 회복제어를 수행하게 되고 이에 따라 BESS의 AGC 주파수제어 신호 추종에 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 따라서, 배터리의 가용성을 고려하여 AGC 주파수제어 신호의 추종을 우선적으로 만족할 수 있도록 BESS의 회복제어를 수행하도록 한다.

2.3 SOC 구간 제어

BESS의 AGC 주파수제어는 배터리의 SOC에 따라 가용도가 결정되기 때문에 배터리의 가용성을 극대화하기 위한 SOC 관리가 필요하다. 더욱이, 충·방전 횟수로 결정되는 배터리의 수명이 다음 그림 3과 표 1에서와 같이 충·방전 깊이를 나타내는 Depth of Discharge(DoD)와 SOC 운영 구간에 따라 크게 달라진다.[11], [12]

즉, 배터리는 DoD가 커질수록 수명이 감소하며, 동일한 DoD로 운전되더라도 SOC 운영 구간에 따라 수명이 상이해질 수 있기 때문에 SOC의 변동 범위를 적정 구간 이내로 제어함으로써 배터리의 수명과 가용성을 동시에 극대화 할 수 있다.

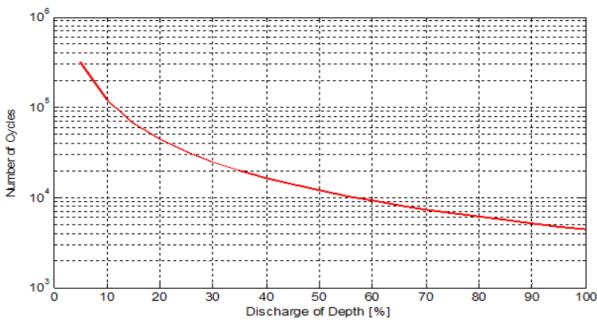


그림 3 DoD에 따른 배터리 수명 특성 예
 Fig. 3 Example of the expected life of Battery according to DoD

표 1 SOC 운전 구간 및 DoD에 따른 배터리 수명 특성 예
 Table 1 Example of the expected Life of Battery according to DoD & SOC band

DoD [%]	Battery SOC 운영 구간 [%]	수명 [cycle]
100	0 ~ 100	4,000
75	25 ~ 100	5,651
	0 ~ 75	8,508
50	50 ~ 100	7,746
	25 ~ 75	11,556
30	50 ~ 80	20,317

2.4 PCS 손실 최소화

BESS는 전력변환설비인 PCS를 통해 전력 계통에 연계되어 충·방전을 통한 AGC 주파수제어를 수행하게 됨에 따라 PCS의 전력 변환 효율은 BESS의 AGC 주파수제어에서 매우 중요한 고려 요소이다. 그림 4는 PCS의 부하율에 따른 효율의 변동 예를 나타내는데 부하율이 낮아질 경우, 효율이 극도로 저하됨을 알 수 있다.[13]

따라서 PCS를 효율이 높은 부하율 구간에서 운전하거나 정지 시킴으로써 PCS의 운전 효율을 관리할 필요가 있다.

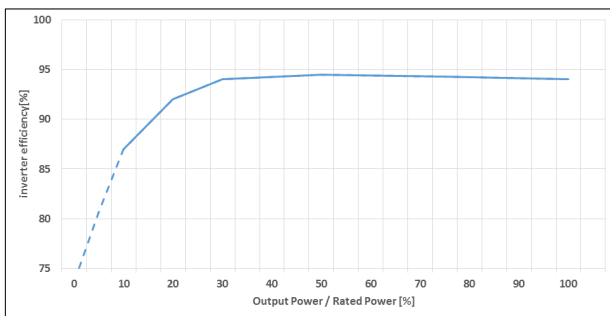


그림 4 PCS 부하율에 따른 인버터 효율 예
 Fig. 4 Example of the Inverter Efficiency according to loading level

3. BESS를 통한 AGC 추종 제어 알고리즘

본 장에서는 앞 장에서 기술된 고려사항들을 반영하여 AGC 주파수제어 수행을 위한 BESS의 운영방안을 제시하였다. 본 운영방안에서는 배터리의 가용성 및 주파수제어 신호의 크기에 따라 BESS 제어 모드를 정상 제어, 회복 제어 그리고 저 전력 제어의 총 세 가지로 구분하고 각 제어 모드 별 운전 조건에 따라 배터리의 AGC 주파수제어 추종을 극대화한다. 다음 그림 5는 이러한 제어 전략에 대한 순서도를 나타낸다. 이때, n 은 BESS를 이루는 총 배터리의 개수를 의미한다.

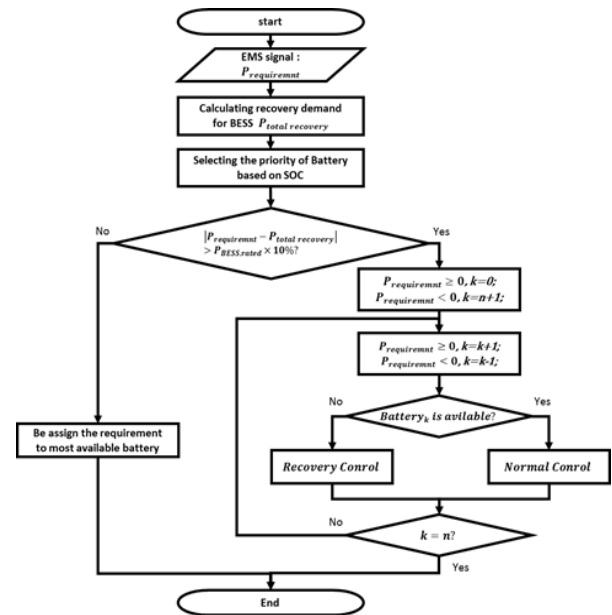


그림 5 AGC 주파수제어 제공을 위한 BESS 제어의 순서도
 Fig. 5 Flow Chart of BESS Control for providing AGC Frequency Control

이때, AGC 주파수제어 신호($P_{requirement}$)와 BESS 내 회복제어 요구량($P_{total, recovery}$)의 합이 BESS 정격($P_{BESS, rated}$)의 10%보다 작을 경우, BESS는 저 전력 제어 모드로 제어되고 그렇지 않은 경우, 배터리의 가용도 순으로 배분되는 주파수제어 요구량과 현재 SOC(SOC_k)와 그리고 이전 회복 제어의 종료 여부 ($indicator_{recovery, k}$)에 따라 정상 제어 모드 또는 회복 제어 모드로 제어된다. 이러한 제어방법에서는 BESS의 제어 가용성을 정확하게 판단하고 AGC 주파수제어 요구량을 만족할 수 있을 경우에만 BESS의 SOC를 관리함으로써 BESS의 SOC 관리로 인해 AGC 주파수제어신호의 추종에 오차가 커지는 기존 방식보다 제어신호의 이행률이 크게 향상될 수 있다. 다음 표 2는 정상 제어 모드와 회복 제어 모드의 판단 기준을 요약한 것이다.

3.1 회복 제어 모드

회복 제어 모드에서는 배터리의 SOC가 운영 범위를 벗어나기

표 2 배터리 가용 여부 판단 기준

Table 2 Criteria for the Availability of Battery

	회복 제어 지속 중인 배터리		회복 제어 종료 된 배터리
	주파수제어 요구량 < 0	주파수제어 요구량 ≥ 0	
SOC_k < 운영 하한	비가용	가용	-
운영 하한 ≤ SOC_k ≤ 운영 상한	비가용 (SOC_k < 회복 하한) 가용 (SOC_k > 회복상한)	가용 (SOC_k < 회복 하한) 비가용 (SOC_k > 회복 상한)	가용
운영 상한 < SOC_k	가용	비가용	-

표 3 회복 제어 모드의 배터리 출력

Table 3 Battery Output in Recovery Control Mode

	동일 단위 제어 그룹 내의 회복 제어 중인 배터리 수	
	n 미만	n
$P_{requirement.post} \leq P_{BESS.available}$	$P_{bat.k} = P_{recovery}$	$P_{bat.k} = P_{recovery}$
$P_{requirement.post} > P_{BESS.available}$	$P_{bat.k} = 0$	

나 이전 회복 제어가 종료되지 않은 비가용 배터리를 대상으로 SOC 회복을 위한 제어를 수행한다. 이때, 계통으로부터 송출된 제어신호의 크기와 계산된 BESS 내 회복제어 요구량을 누적한 제어 요구량($P_{requirement.post}$)을 BESS내 BESS의 가용 출력($P_{BESS.available}$)과 비교하여 가용한 배터리 수에 따라 각 배터리들의 출력($P_{bat.k}$)은 다음 표와 같이 결정된다.

즉, BESS 내에 가용한 배터리가 존재하는 경우, 비가용 배터리의 회복 제어는 BESS의 가용 출력이 송출된 AGC 주파수제어 신호보다 클 경우에만 수행되며 그렇지 않은 경우, 배터리를 Idling 시킨다. 또한, BESS 내 모든 배터리가 비가용일 경우, BESS는 AGC 주파수제어 신호를 추종할 수 없으므로 가용성 확보를 위해 모든 배터리들은 회복 제어를 수행한다. 한편, 이러한 회복 제어에서는 회복 제어의 목표 SOC 범위와 회복 제어의 개시 기준이 되는 SOC 범위 사이에 여유를 둬으로써 SOC 회복 제어 종료 후, SOC 변동에 따른 제어 모드의 불필요한 전환을 방지하였다.

3.2 정상 제어 모드

가용한 배터리에 대해서는 정상 제어 모드가 적용되어 해당 배터리의 SOC에 따라 배분된 AGC 주파수제어 요구량에 추종한다. 다음 식 (1)은 방전 시를 기준으로 정상 제어 모드에서 각 배터리 별 출력을 나타낸다.

$$P_{bat.k} = (P_{requirement.k} - P_{total,recovery}) \times \frac{SOC_{normal,k}}{\sum SOC_{normal,unassigned}} \quad \text{when, } P_{requirement.post} \leq P_{BESS,available} \quad (1)$$

$$P_{bat.k} = P_{requirement.k} \times \frac{SOC_{normal,k}}{\sum SOC_{normal,unassigned}} \quad \text{when, } P_{requirement.post} > P_{BESS,available}$$

$$P_{requirement.k \pm 1} = P_{requirement.k} - \min(P_{rated,k}, P_{bat.k}) \quad (2)$$

$$P_{total,recovery} = \sum P_{recovery,k} \quad (3)$$

이 때, BESS의 가용 출력이 송출된 AGC 주파수제어 신호보다 클 경우에는 사전에 계산된 BESS의 회복제어 요구량을 AGC 주파수제어 요구량에 누적하여 배터리에 할당한다. 이를 통해, BESS는 AGC 주파수제어 신호에 대한 추종 오차를 최소화함과 동시에 가용 출력에 따라 비가용 배터리의 가용성을 확보할 수 있다. 또한, SOC에 따라 배터리에 할당된 AGC 주파수제어 요구량이 해당 배터리의 정격을 초과하는 경우, 식 (2)을 통해 초과 할당량을 다른 배터리에 효과적으로 배분하기 위해 SOC가 높은 순으로 할당된다. 다만, AGC 주파수제어 신호가 충전을 요할 경우, 위와 같은 제어 전략에서 SOC 대신 충전 가용성 (100% - SOC)을 기준으로 제어가 수행된다.

3.3 저 전력 제어 모드

저 전력 제어 모드에서는 2.4절에서 기술된 바와 같이 낮은 부하율에서 나타나는 PCS의 효율 극감 현상을 최소화하기 위해 BESS 내의 PCS 간에 부하율을 조정한다. 이를 위해 계통으로부터 지령된 AGC 주파수제어 신호와 BESS의 회복 제어 요구량의 누적값이 BESS 정격 출력의 10% 보다 작을 경우, BESS 내의 가용한 배터리 중에 가장 가용도가 높은 배터리($P_{bat,mostavail.}$)에 다음 식 (4)와 같이 모든 제어 요구량을 할당한다.

$$P_{bat,mostavail.} = P_{requirement} - P_{totalrecovery} \quad (4)$$

단, BESS 내의 모든 배터리들이 비가용일 경우, 회복 제어에 서와 같이 모든 배터리들은 회복 제어를 수행한다.

4. 사례 연구

본 사례 연구에서는 국내 실계통의 정상상태 주파수 이력 데이터를 기준으로 AGC 주파수제어 신호를 가정하고, 이에 대한 BESS의 추종 운영 결과를 분석하여 제안된 운영방안의 유효성을 검증하였다. 다음 그림 6은 3일 동안 국내 계통에서 측정된 정상 상태 주파수를 나타낸다.

위 그림과 같이 예측된 주파수는 99%가 공칭 주파수인 60Hz 으로부터 ±0.04Hz 편차 이내에 유지되었다.

다음 그림 7은 본 사례 연구에서 가정한 AGC 주파수제어 신

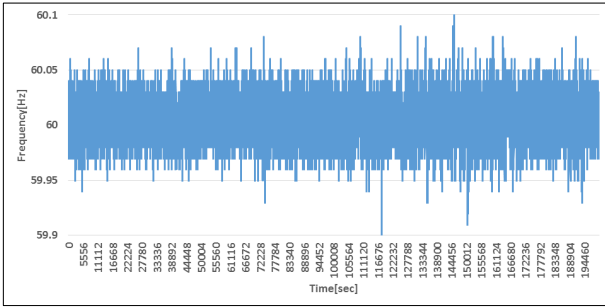


그림 6 3일간 측정 주파수
Fig. 6 Measured Frequency for 3 Days in Power System

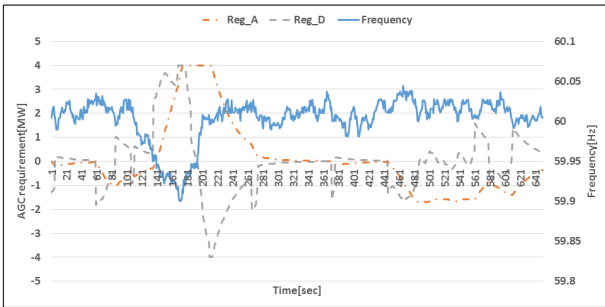


그림 7 송출 방식 별 AGC 주파수제어 신호(Reg A & Reg D)
Fig. 7 AGC Frequency Control Signal (REG A & REG D)

표 4 BESS 시뮬레이션 설정값
Table 4 Simulation Assumptions of BESS

항목	값	항목	값
Battery 사양	1MW/ 0.5MWh × 4	SOC 회복 목표	65[%]
Battery#1 초기 SOC	50[%]	SOC 운전 범위	50~80[%]
Battery#2 초기 SOC	60[%]	SOC 회복 제어 범위	60~70[%]
Battery#3 초기 SOC	70[%]	회복 제어량	10% of $P_{BESS, rated}$
Battery#4 초기 SOC	80[%]	배터리 충·방전 효율	90[%]

호로서 앞에서 기술된 PJM의 경우를 참고하여 발전기에 대한 REG A와 속응 자원에 대한 REG D로 구성되어 있다.

그림 7에서 속응 자원에 송출되는 REG D는 주파수 변동의 고주파 성분을 이용하여 제어 신호가 계산됨에 따라 REG A의 제어 신호보다 변동이 빠름을 알 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 REG D를 BESS의 AGC 주파수제어 수행을 위한 제어 신호로 가정하였다.

표 4는 제안된 운영방안의 유효성 검증을 위해 가정한 BESS의 설정값으로 1MW/0.5MW 정격의 배터리 4대로 이루어진 단위 시스템을 가정하였다. 또한, SOC에 따른 비례배분 검증을 위해

배터리 별 초기 SOC를 다르게 가정하였고, SOC 유지 구간은 특정 배터리의 수명을 고려하여 가정된 값이다.

다음은 제안된 운영방안에 따른 BESS의 행동 결과를 세분화하여 분석하였다. 우선, 그림 8은 방전 시의 AGC 주파수제어 신호 추종을 위한 BESS의 행동 결과를 나타낸다.

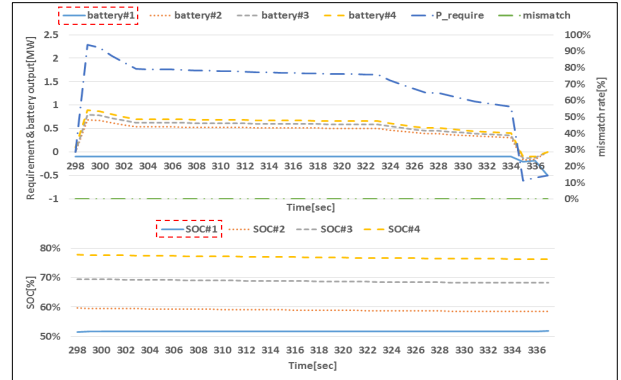


그림 8 방전 제어 신호에 대한 BESS 제어
Fig. 8 BESS Output to Discharging Requirement from AGC

위 사례에서는 BESS 내 가용 출력이 충분하기 때문에 Battery#1이 방전 시 비가용 상태임에도 불구하고 회복 제어를 통해 가용성을 확보함을 확인할 수 있으며, 가용한 배터리들은 SOC에 따라 비례배분을 수행함으로써 BESS가 AGC 주파수제어 신호에 정확하게 추종함을 확인할 수 있다. 더욱이 Battery#4의 SOC가 약 68%로 가장 높기 때문에 보다 많은 방전을 수행함을 보인다.

두 번째로 그림 9는 충전 시의 AGC 주파수제어 신호 추종을 위한 BESS의 출력 행동 결과를 나타낸다.

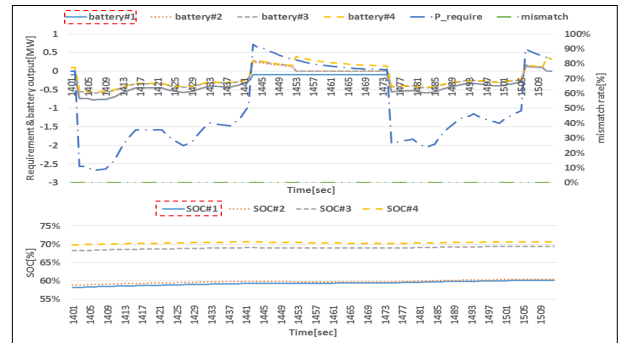


그림 9 충전 제어 신호에 대한 BESS 제어
Fig. 9 BESS Output to Charging Requirement from AGC

위 사례 또한 Battery#1이 방전 시에는 비가용 상태로 판단되지만, 충전 시 가장 가용한 자원으로 판단됨에 따라 비례배분을 통해 다른 배터리보다 많은 충전을 수행함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 BESS가 AGC 주파수제어 신호에 정확하게 추종함을 확인할 수 있다.

세 번째는 모든 배터리가 비가용 상태인 경우로 회복 제어를 수행한 결과가 다음 그림 10과 같다.

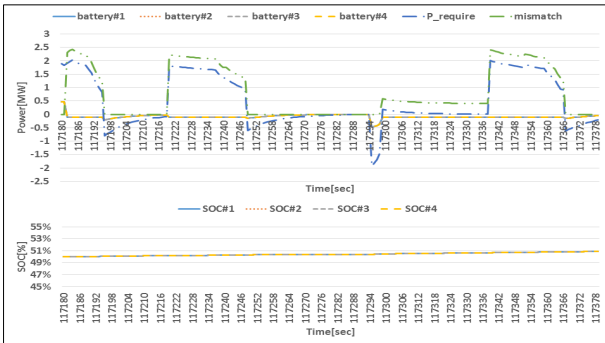


그림 10 BESS 내 모든 배터리들의 회복 제어
Fig. 10 Recovery Control of all Batteries at BESS

앞선 두 사례들과 달리 BESS 내 모든 배터리들의 SOC가 운영 범위 하한에 도달하여 더 이상 방전 제어 신호에 정확한 추종을 수행하지 못함을 확인할 수 있다. 위 상황에서 배터리들은 제어 가용성 확보를 위해 정격의 10% 수준으로 회복제어를 수행한다. 하지만, 충전 제어 신호에 대해서는 모든 배터리들이 가용 상태로 판단됨에 따라 정확히 추종함을 확인할 수 있다.

마지막으로 AGC 주파수제어 신호의 크기가 낮을 경우에 PCS의 효율 관리를 위한 저 전력 제어 모드에 대한 BESS 응답 결과이다.

다음 사례에서는 모든 배터리가 가용 상태이지만, 제어 신호의 크기가 BESS 정격의 10%보다 낮아짐에 따라 가장 가용성이 뛰어난 Battery#4가 모든 제어를 수행함을 확인할 수 있다. 이를 통해 BESS가 제어 신호에 정확히 추종하며, PCS 효율 관리를 위한 적절한 제어 배분이 수행됨을 보인다.

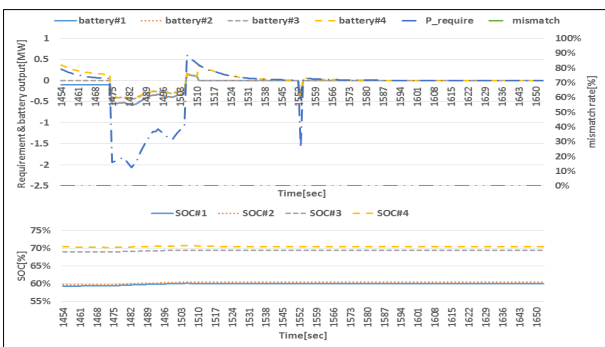


그림 11 BESS의 저 전력 제어
Fig. 11 Low Power Control of the BESS

다음으로는 BESS의 AGC 주파수제어 신호 추종을 위해 제안된 본 운영방안의 성능을 종합적으로 평가하였다.

우선, 제어 추종에 대한 분석으로 그림 12는 3일 간 BESS의 주파수제어 신호에 대한 추종 오차의 지속 곡선을 나타낸다.

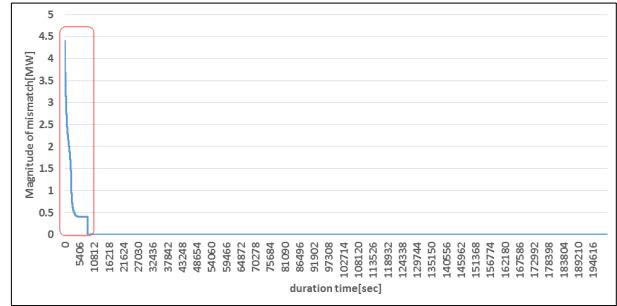


그림 12 BESS의 AGC 주파수제어 추종 오차 지속 곡선
Fig. 12 LFC Error Duration curve of the BESS

그림 12와 같이, 전체 3일의 기간에서 약 2.3시간 동안 오차 발생하였으며, 이는 전체 시간 중 약 3%에 해당한다. 또한, 다음 표 5는 AGC 주파수제어 신호와 BESS의 응답 결과를 비교한 것이다.

표 5 AGC 주파수제어 송출 신호와 BESS 추종 응답 분석
Table 5 Analysis of LFC Requirements and BESS Outputs

	값		값
충전 요구량	48,108.6 [MWsec]	BESS 출력	93,217.8 [MWsec]
방전 요구량	53,828.5 [MWsec]	출력 오차	8,719.4 [MWsec]
총 요구량	101,937.2 [MWsec]	이행률 (based on time)	96.80 [%]

위 표를 통해, 3일 동안 약 96.80% 수준으로 AGC 주파수제어 신호를 추종하였다. 이때 BESS가 AGC 주파수제어 신호를 추종하지 못한 경우는 모든 배터리가 비가용할 경우이며, 이는 본 사례 연구에서 BESS의 정격만을 기준으로 AGC 주파수제어 신호를 가정함에 따른 결과로서 계통 운영자가 BESS의 가용 여부를 판단하고 적절한 주파수제어 신호를 지령할 경우, 제어 신호 추종 오차는 감소할 것으로 판단된다.

그림 13은 BESS의 AGC 주파수제어 신호 추종에 따른 출력 결과를 나타내며, 그림 14는 동일 기간 동안의 SOC 변동을 나타낸다. BESS 내 배터리들은 제어 신호의 추종에 있어 가용성이 높을수록 제안된 운영방안에 따라 제어에 적극적으로 참여한다. 그로 인해 배터리 별 초기 SOC가 다르게 가정되었지만, 제어가 지속됨에 따라 모든 배터리들의 SOC가 4시간 이내에 동일하게 됨을 확인할 수 있다.

즉, 제안된 운영방안에 따라 모든 배터리의 SOC가 제어 시작 이후 13,880초 이내에 동일한 수준으로 확보되었으며, SOC가 제어 구간인 50~80% 이내로 유지됨을 확인할 수 있다.

마지막은 PCS의 운영 효율에 대한 분석으로 저 출력 제어 모드 수행 유무에 따라 배터리 별 출력이 정격의 10%보다 낮게 수행한 출력 비율을 기준으로 비교하였다. 다음 표 6은 BESS의 저

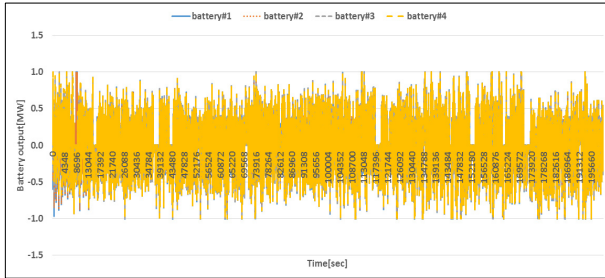


그림 13 배터리들의 AGC 주파수제어 출력
 Fig. 13 Outputs of Batteries to AGC Frequency Control

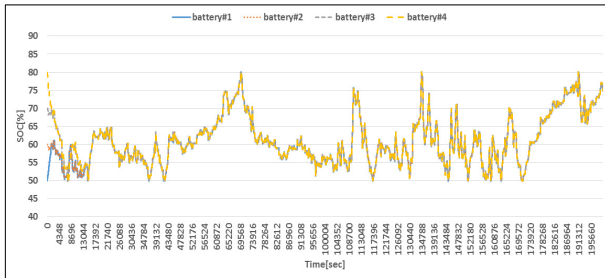


그림 14 배터리들의 SOC 변동
 Fig. 14 SOC of Batteries in AGC Frequency Control

표 7 저 전력 제어 모드 고려 유무에 따른 BESS의 저출력 비율 분석
 Table 7 Portion Analysis of Low Power Operation of BESS

	고려 이전	고려 이후
저 출력 ($P_{bat,k} < 10\%$ of $P_{BESS, rated}$) 수행 비율	51.84[%]	13.27[%]

출력 수행 비율에 대한 분석 결과를 나타낸다. 저 전력 제어 모드를 통해 제어를 수행함으로써 낮은 부하에서의 출력 발생율을 약 38% 감소시킴으로써 PCS의 효율 향상에 상당히 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 나머지 저 전력 출력에 대한 응답 13.27%는 낮은 AGC 주파수제어 요구량이 지령됨에 따라 나타난 결과로 분석된다.

5. 결 론

본 논문에서는 다수의 배터리로 구성된 BESS를 대상으로 전력계통의 AGC 주파수제어 신호를 보다 효과적으로 추종하기 위한 운영방안을 제안하였다. 즉, BESS를 구성하는 다수 배터리의 개별 SOC와 AGC 주파수제어 신호의 크기에 따라 운전모드를 정상 제어와 회복 제어 그리고 저 전력 제어 모드로 구분하고 각 제어 모드 별 최우선 목표를 제어 신호의 추종, 배터리의 SOC 회복, 그리고 PCS의 효율 관리로 각각 적용함으로써 BESS의 가용성을 극대화하였다.

또한, 국내 실계통의 정상상태 주파수 이력 데이터를 기준으로 BESS의 AGC 주파수제어 추종 운영을 모의하는 사례 연구를 통해 제안된 운영방안의 유효성을 검증하였다.

제안된 운영방안에 따라 배터리의 SOC가 가용 범위에 있는 경우, BESS는 AGC 주파수제어 신호에 대한 추종성을 확보할 수 있음을 확인하였고, 배터리의 SOC 또한 설정된 유지 범위 이내로 유지될 수 있었다. 또한, BESS의 출력이 낮은 경우에도 적절한 출력 배분으로 PCS의 효율 급감을 방지할 수 있음을 확인하였다. 향후, BESS도 EMS를 통해 AGC 주파수제어 서비스에 참여할 것으로 예상됨에 따라 계통 운영자가 BESS의 특성을 고려하여 적절한 제어 신호를 송출할 경우, 제안된 운영방안의 효과는 더욱 커질 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구의 일부 내용은 KC코트렐 주관 “모듈형 복합 분산 전원 시스템 개발 및 실증(G031521211)”의 일환으로 수행 되었으며, 관계 기관의 협조에 감사드립니다.

References

- [1] A.G. Ter-Gazarian, “Energy Storage for Power Systems,” The Institution of Engineering and Technology, 2011
- [2] “K-ESS 2020,” Ministry of Trade, Industry and Energy, May, 2011
- [3] “ESS plan for frequency regulation in 2015,” KEPCO, May, 2015
- [4] Shuaixun Chen, Tian Zhang, H. B. Gooi, Ralph D. Masiello, and Warren Katzenstein, “Penetration Rate and Effectiveness Studies of Aggregated BESS for Frequency Regulation,” IEEE Transactions On Smart Grid, Vol. 7, No. 1, Jan. 2016
- [5] Hongyan Piao, Shifeng Chen, Haichao Lv, and Haoming Liu, “Control Strategy of Battery Energy Storage System to Participate in the Second Frequency Regulation,” Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST) International Symposium on, Sept. 2015
- [6] Yunzhi Cheng, Mehriar Tabrizi, Mandhir Sahn, Alfredo Povedano, and David Nichols, “Dynamic Available AGC Based Approach for Enhancing Utility Scale Energy Storage Performance,” IEEE Transactions On Smart Grid, Vol. 5, No. 2, Mar. 2014
- [7] Bolun Xu, Alexandre Oudalov, Jan Poland Andreas Ulbig and Goran Andersson, “BESS Control Strategies for Participating in Grid Frequency Regulation,” Preprints of the 19th World Congress The International Federation of

Automatic Control Cape Town, South Africa, 2014

- [8] Atsushi Hashimoto, Akihiko Yokoyama, "A New Control Strategy of Multiple Sets of Battery Energy Storage System for Load Frequency Control in Power System with Massive Integration of Renewable Energy Resources," IEEE Power Systems Computation Conference (PSCC), 2014
- [9] "Operating criteria for ancillary service," KPX, May, 2015
- [10] "PJM Manual 12 : Balancing Operations," PJM, Aug. 2014
- [11] D.-I. Stroe et al., "Degradation Behaviour of Lithium-Ion Batteries based on Field Measured Frequency Regulation Mission Profile," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE, in press.
- [12] "Analysis of battery lifespan depend on DOD," Samsung SDI, 2013
- [13] "Sandia National laboratories, Sandia national laboratories inverter database," Sandia National laboratories, 2014.[Online]. Available:
http://www.gosolarcalifornia.ca.gov/equipme-nt/inverter_tests/summaries/dd



국 경 수 (Kyung Soo Kook)

1973년 6월30일생. 1996년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 석사(전력계통). 1998~2004년 한국 전기연구원(KERI) 연구원/선임연구원. 2007년 Virginia Tech. 전기공학박사(전력계통), 2007~2010년 미국 전력연구원(EPRI) 선임연구원 2010년~현재 전북대학교 전기공학과 부교수
Tel : 063-270-2368
E-mail : kskook@jbnu.ac.kr

저 자 소 개



최 우 영 (Woo Yeong Choi)

1993년 2월 20일생. 2014년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2014년~현재 동 대학원 전기공학 석사과정
Tel : 070-4411-2368
E-mail : ventus666@jbnu.ac.kr



유 가 램 (Ga Ram Yu)

1989년 2월 20일생. 2013년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
Tel : 070-4411-2368
E-mail : garam1838@jbnu.ac.kr