

전력계통 주파수조정을 위한 SOC 기반의 배터리 에너지저장장치 제어전략

SOC-based Control Strategy of Battery Energy Storage System for Power System Frequency Regulation

윤준영* · 유가람* · 국경수[†] · 노도환* · 장병훈**

(Jun Yeong Yun · Garam Yu · Kyung Soo Kook · Do Hwan Rho · Byung Hoon Chang)

Abstract - This paper presents the SOC-based control strategy of BESS(Battery Energy Storage System) for providing power system frequency regulation in the bulk power systems. As the life cycle of BESS would be shortened by frequent changes of charge and discharge required for frequency regulation in a steady state, the proposed algorithm operates BESS within a range of SOC where its life cycle can be maximized. However, during a transient period of which occurrence frequency is low, BESS would be controlled to use its full capacity in a wider range of SOC. In addition, each output of multiple BESS is proportionally determined by its SOC so that the balance in SOC of multiple BESS can be managed. The effectiveness of the proposed control strategy is verified through various case studies employing a test system. Moreover, the control result of BESS with the measured frequency from a real system shows SOC of BESS can be maintained within a specific range although the frequency deviation is biased.

Key Words : Battery energy storage system, State of charge, Control strategy, Frequency regulation, Power system stability, Power system frequency, Generator trip

1. 서 론

현대 생활의 필수품인 전기에너지를 공급하는 전력계통은 핵심 에너지 인프라이지만 최근 에너지 수요의 전기화 등에 따른 전력수요의 꾸준한 증가에 비해 환경문제 등의 제약으로 설비투자가 충분히 이루어지지 못하고 있고, 신재생 발전원들의 경쟁적 도입이 확대됨에 따라 전력공급 신뢰도와 품질의 저하에 대한 우려가 높아지고 있다[1]. 특히 전력계통 주파수는 전력계통의 가장 중요한 임무인 전력수급의 지표가 되는 파라미터로써 전력계통에 부하변동이나 발전기 탈락과 같은 외란이 발생될 경우 전력계통 전체의 주파수에 왜곡을 초래하고 이를 즉각 회복시키지 못하거나 순간적인 주파수변동 폭이 한계치를 벗어날 경우 전기 소비자들의 설비 성능을 저하시키거나 정전을 유발할 수 있는데 지속적인 전력계통 규모의 확대와 신재생 발전원의 수용을 증가시키는 이러한 전력계통의 주파수제어 자원에 대한 수요를 더욱 높이고 있다.

배터리 에너지저장장치는 최근 전력제어기의 고도화와 배터리 단가의 경감을 통해 전력계통 운영의 효율성 개선에 적극적으로 적용되고 있으며 전력시장에서도 에너지 저장장

치들을 적극적으로 도입하기 위한 노력을 기울이고 있다[1]. 특히 계통 상황에 따라 급속한 변동이 나타나는 계통 주파수의 경우 배터리 에너지저장장치의 속응성은 계통 주파수 제어에 매우 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 기대되고 있다[2][3][4]. 국내에서도 지식경제부가 발표한 K-ESS 2020 계획[5]에 따라 표 1과 같이 배터리 에너지저장장치에 대한 연도별 투자 목표를 설정하여 R&D 및 설비 투자를 적극적으로 추진하고 있다.

특히, 현재 제주도 조천변전소에서는 1MWh급 리튬이온 배터리 8대와 2MW급 BESS-PCS 2대가 계통에 병렬로 연결되어 실증 중에 있다[5]. 한편 배터리 에너지저장장치는 외부 전원으로부터 충전하였던 전력을 다시 방전하여 사용하게 되고 이러한 충·방전 횟수가 그 수명을 결정하게 됨에 따라 지속적으로 발생하는 전력계통 주파수의 변동에 대응하여 배터리 에너지저장장치를 제어할 경우 배터리 에너지

표 1 국내 BESS 연도별 투자 목표

Table 1 Annual Investment Target on BESS in Korea

[단위 : 억원]

구분	2011년	2012년	2013년	2014년	2015년	16~20년	계
R & D	정부	376	391	455	488	385	2,951
	민간	1,128	1,174	1,366	1,465	1,154	8,854
	합계	1,504	1,565	1,821	1,953	1,539	11,805
설비	840	1,375	2,306	3,058	2,578	34,243	44,400

[†] 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

** Korea Electric Power Research Institute, Korea

Received : March 28, 2014; Accepted : April 24, 2014

저장장치의 경제성을 악화시킬 수 있으며, 특히 배터리 에너지저장장치의 빠른 제어성능이 요구되는 전력계통의 과도 상태에서 가용한 제어용량을 충분히 확보하지 못할 수 있다. 하지만, 배터리 에너지저장장치를 이용한 기존의 주파수제어 연구에서는 주파수제어의 불감대를 설정하여 작은 주파수 변동에 대해서는 배터리 에너지저장장치를 단순히 대기하도록 하고 불감대 이외의 조건에서는 기존 발전기의 DROOP 제어특성을 적용하고 있어 배터리 에너지저장장치의 에너지 관리나 충·방전 빈도증가에 의한 수명경감 등을 고려하지 못하고 있다[6]. 또한, 다수의 배터리 에너지저장장치들 사이의 제어협조를 고려하지 못함으로써 정상상태 및 과도상태에서 배터리 에너지저장장치의 설비용량 규모에 따라서는 주파수제어의 과보상을 야기할 수 있다[7][8].

따라서 본 논문에서는 대규모 전력계통에서 배터리 에너지저장장치를 보다 효과적으로 사용하기 위해 계통 상황에 따라 배터리 에너지저장장치의 충전상태(SOC: State of Charge)를 고려한 전력계통 주파수 제어전략을 제안하였다. 즉, 주파수 변동의 폭이 작고 빈도가 높은 전력계통의 정상상태에서는 배터리 에너지저장장치가 충·방전에 의한 수명경감이 작은 SOC구간 내에서 주파수 제어를 수행하도록 하고, 주파수 변동의 폭이 크고 빈도가 낮으며 속응제어의 중요성이 더 높은 전력계통의 과도상태에서는 배터리 에너지저장장치의 가용용량을 최대한 사용하여 주파수 제어를 수행하도록 함으로써 주파수제어에 의한 배터리 에너지저장장치의 수명단축은 최소화 하면서 속응제어에 의한 계통주파수 제어효과를 극대화 할 수 있다. 또한, 정상상태와 과도상태에서 주파수 변동 시 배터리 에너지저장장치의 총 설치 용량에 대한 주파수제어 요구량을 먼저 계산한 후 이를 각 배터리 에너지저장장치의 SOC에 따라 비례 배분하여 제어함으로써 배터리 에너지저장장치의 SOC를 보다 효과적으로 관리하고 주파수에 대한 과보상 가능성을 방지할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 제안된 배터리 에너지저장장치의 주파수제어 알고리즘을 시험계통에 적용하여 그 유효성을 검증하고 이를 국내 전력계통 주파수 실측치에 적용해 봄으로써 배터리 에너지저장장치의 SOC 관리효과를 확인하였다.

2. 주파수제어 적용을 위한 배터리 에너지저장장치 고려사항

전력계통에서는 전력수요의 변동, 계통고장의 발생, 그리고 발전기들의 출력제어에 의해 주파수가 지속적으로 변동된다. 따라서 배터리 에너지저장장치를 전력계통의 주파수제어에 적용할 경우 빈번한 충·방전으로 인해 배터리의 수명이 단축됨에 따라 배터리 에너지저장장치의 경제성 악화가 지적되고 있다. 하지만, 배터리 제조사들의 실험 결과를 살펴보면, 충·방전 횟수로 나타나는 배터리의 수명은 충·방전의 깊이에 따라 크게 달라진다. 다음 그림 1은 리튬이온 배터리의 방전실험을 통해서 나온 배터리의 방전 깊이와 수명과의 관계를 나타낸 결과이다[9].

그림 1에서와 같이 배터리의 수명은 각 충·방전시의 방전 깊이에 반비례하고, 방전 깊이의 구간에 따라 배터리의 수명에 대한 방전 깊이의 영향이 달라짐을 알 수 있다. 하지만, 배터리 에너지저장장치가 전력계통 주파수 제어에 적용되어

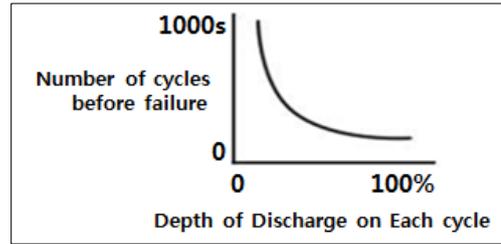


그림 1 배터리의 방전 깊이와 수명과의 관계
Fig. 1 Life Cycle vs Depth of Discharge

빈번한 충·방전을 지속하더라도 변동주기가 매우 짧은 전력계통 주파수의 특징으로 인해 배터리 에너지저장장치의 충·방전 깊이는 작을 것으로 예상되어 이로 인한 배터리 에너지저장장치의 수명단축의 영향은 제어전략에 따라 경감될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 다음 표 2는 특정 리튬이온 배터리의 제조업체에서 제공한 배터리의 방전 깊이와 이에 해당하는 잔존용량 구간에 따라 배터리 수명을 산정한 실험 결과이다.

표 2 배터리방전깊이 구간별 수명
Table 2 Life Cycle of BESS with different Depth of Discharge

DOD	SOC Swing Range	Charging C-Rate	Discharging C-Rate	Life Cycle (End Of Life=80%)
100%	0%~100%	1C	1C	4000
75%	25%~100%			5651
	0%~75%			8508
50%	50%~100%			7746
	25%~75%			11556
30%	50%~80%			20317

표 2에서와 같이 방전 깊이가 깊어질수록 배터리의 수명은 감소하며, 방전 깊이가 동일한 경우에는 방전이 이루어진 잔존용량 구간에 따라 배터리의 수명이 달라짐을 알 수 있다. 특히, 표 2의 배터리의 경우 실험된 방전 깊이와 잔존용량 구간 중 잔존용량 50% ~ 80% 구간에서 30% 방전 깊이로 운영하였을 때 수명이 가장 길게 나타났다. 즉, 특정 배터리 에너지저장장치에는 이와 같이 배터리 수명을 최대화 할 수 있는 잔존용량 운전구간이 존재하게 된다. 따라서 전력계통 주파수조정을 위한 배터리 에너지저장장치의 제어전략은 잦은 충·방전제어가 배터리의 수명이 극대화 되는 잔존용량 구간에서 이루어지도록 설정되어야 한다.

3. SOC를 고려한 배터리 에너지저장장치 제어전략

본 절에서는 주파수 변동의 특징이 다르게 나타나는 전력계통의 운전조건을 고려하여 배터리 에너지저장장치의 제어를 정상상태와 과도상태로 구분하여 제안하였다. 즉, 정상상태에서는 배터리의 수명단축을 최소화하기 위하여 배터리가 특정 SOC 구간 내에서 주파수조정에 참여되도록 제어하고, 과도상태에서는 배터리 에너지저장장치의 동적성능을 최대한 발휘하도록 제어하였다. 이때, 전력계통의 과도상태는

주파수의 변화율을 기준으로 결정된다. 또한, 과도상태 이후 계통 주파수가 회복되는 시점에는 배터리 에너지저장장치의 출력을 일정 비율로 감소하여 정상상태 제어전략으로 복귀된다[10][11][12][13].

3.1 배터리 에너지저장장치의 정상상태 제어전략

전력계통의 정상상태에서는 전력 수요의 예측오차에 따라 주파수 변동이 발생되어 그 변동의 폭이 작고 빈도가 높다. 따라서 정상상태에서 주파수조정을 위해 배터리 에너지저장장치가 제어될 경우 잦은 충·방전이 요구되어 배터리의 수명에 영향을 줄 수 있지만 요구되는 방전의 깊이는 상대적으로 작기 때문에 이로 인한 배터리의 SOC 변동은 크지 않을 것이다. 본 절에서는 이러한 정상상태 주파수 변동의 특징을 고려하여 변동이 크지 않은 배터리의 SOC 운전 구간을 배터리 수명이 가장 길수 있는 구간으로 제한하여 잦은 충·방전에 의한 배터리 수명 감소를 최소화 하도록 하는 제어전략을 수립하였다. 다음 그림 2는 이러한 제어전략을 정리한 것이다.

그림 2에서와 같이, SOC가 80% 이상에서는 배터리 에너지저장장치가 SOC 비례배분제어에 의한 방전 제어만을 하고, 50% 이하에서는 SOC 잔량에 따른 비례배분제어에 의한 충전만이 가능하도록 제어된다. 배터리 에너지저장장치의 SOC가 정상범위에 있는 경우에는 계통 주파수 변동에 따라 기존 발전원의 4% DROOP 특성을 적용한 비례계수 K_d 값을 이용하여 총 배터리 에너지저장장치의 주파수제어 요구량을 먼저 계산한 후 이를 각 배터리 에너지저장장치의 SOC에 따라 비례 배분하여 각 배터리 에너지저장장치를 제어 한다.

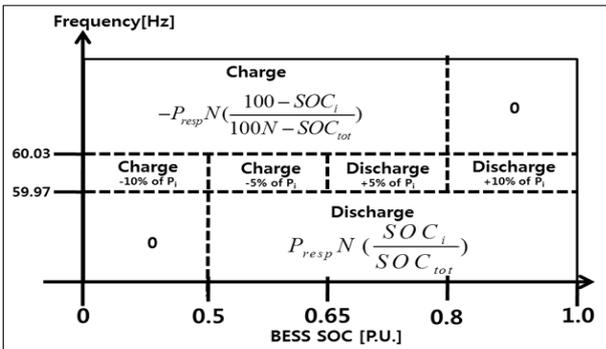


그림 2 정상상태 제어전략
Fig. 2 Control strategy for steady state

$$\begin{aligned}
 &\text{단, } P_{resp} = K_d \Delta f [MW], \quad K_d = \Delta P / \Delta f [MW/Hz], \\
 &\Delta f = f_{ref} - f [Hz], \quad N = \text{The number of Available BESS}, \\
 &P_i = \text{Rated Power of BESS} [MW], \\
 &SOC_i = \text{SOC of BESS} [P.U.], \\
 &SOC_{tot} = \sum_{i=1}^N SOC_i [P.U.], \quad i = \text{Number of BESS}
 \end{aligned}$$

또한, 배터리 에너지저장장치의 불필요한충·방전 동작을 방지하기 위해 $60 \pm 0.03 \text{Hz}$ 를 주파수 불감대로 설정하고[14],

불감대 영역에서는 각 배터리 에너지저장장치의 SOC 수준에 따라 정격의 5% 혹은 10%로 배터리 에너지저장장치를 충·방전함으로써 각 배터리 에너지저장장치의 SOC를 일정 수준으로 유지하게 된다.

한편 배터리 에너지저장장치는 전력계통 주파수의 하락율이 일정 기준(ξ)보다 0.1초 이상 지속적으로 작아지는 경우 계통이 과도상태에 진입한 것으로 가정하여 제어전략을 정상상태 제어용에서 과도상태 제어용으로 변경하게 되는데 이때 기준이 되는 주파수 하락율은 계통에 병입 되어 운전 중인 발전기 중 최소발전기 탈락 시에 예상되는 주파수 변화율(Rate of Change of Frequency)값으로 설정하여 최소규모 이상의 발전기가 탈락되면 과도상태가 감지되도록 하였다[15][16].

3.2 배터리 에너지저장장치의 과도상태 제어전략

발전기 탈락과 같은 외란이 발생한 직후인 전력계통의 과도상태에서는 순간적인 주파수 변동이 발생되어 그 변동의 폭이 큼에 따라, 배터리 에너지저장장치의 과도상태 제어전략에서는 속응제어에 의한 계통주파수 제어효과를 극대화할 수 있도록 계통정수 K를 제어계수로 적용하여 총 배터리 에너지저장장치에 대한 제어요구량을 계산 한 후, 이를 각 배터리 에너지저장장치의 SOC에 따라 비례 배분하여 제어 한다. 다음 표 3은 이러한 과도상태 제어전략을 요약한 것이다[17].

표 3 과도상태 제어전략
Table 3 Control strategy for transient period

SOC	주파수	BESS 출력
$0\% \leq \text{SOC} < 10\%$	$60\text{Hz} \leq f$	$\min[-P_i, -P_{req}(\frac{100 - \text{SOC}_i}{100N - \text{SOC}_{tot}})]$
	$f < 60\text{Hz}$	0
$10\% \leq \text{SOC} < 90\%$	$60\text{Hz} \leq f$	$\min[-P_i, -P_{req}(\frac{100 - \text{SOC}_i}{100N - \text{SOC}_{tot}})]$
	$f < 60\text{Hz}$	$\min[P_i, P_{req}(\frac{\text{SOC}_i}{\text{SOC}_{tot}})]$
$90\% \leq \text{SOC} \leq 100\%$	$60\text{Hz} \leq f$	0
	$f < 60\text{Hz}$	$\min[P_i, P_{req}(\frac{\text{SOC}_i}{\text{SOC}_{tot}})]$

단, $P_{req} = K \Delta f [MW]$, $K = \text{System Constant} [MW/Hz]$

표 3에서와 같이, 배터리의 SOC가 10%와 90%사이에 있을 경우 계통 주파수 변동에 따라 총 배터리 에너지저장장치에 대한 제어요구량을 계산 한 후, 이를 각 배터리 에너지저장장치의 SOC에 따라 비례 배분하여 충·방전 출력을 제어 한다. 그리고 SOC가 10% 미만일 경우에는 SOC 잔량에 따라 비례배분제어에 의한 충전제어 만을 하며, SOC가 90% 이상일 경우에는 SOC에 따라 비례배분제어에 의한 방전제어 만을 수행한다.

또한, 이러한 과도상태를 거쳐 전력계통 주파수가 회복될 경우 제어전략 전환에 따른 급격한 출력변동으로 인해 발생

할 수 있는 계통영향을 최소화하기 위하여 배터리 에너지저장장치의 출력량을 일정 비율로 감소하여 그 값이 DROOP 비례정수에 따른 배터리 에너지저장장치 출력량과 같게 되면 다시 정상상태 제어전략을 적용한다. 이때 전력계통 주파수의 회복여부는 전력계통의 주파수가 59.8Hz 이상이고, 0보다 큰 계통 주파수의 변동율이 0.1초 이상 지속되는지의 여부로 판단된다.

4. 사례연구

본 절에서는 제안된 SOC를 고려한 배터리 에너지저장장치의 전력계통 주파수 제어전략을 시험계통에 적용하여 그 유효성을 검증하였다. 그림 3의 시험계통은 총 발전량 702.2MW, 총 부하량 699.2MW로 가정하였으며, 14기의 발전기와 48개의 선로로 구성되었다. 또한, 사례연구의 편의를 위해 그림 3에서와 같이 배터리 에너지저장장치의 위치를 가정하였다.

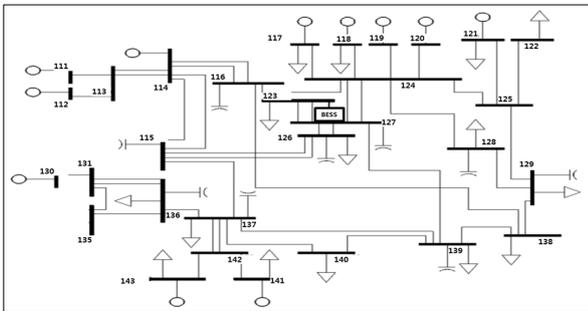


그림 3 시험계통
Fig. 3 Test System

4.1 정상상태 제어결과

본 절에서는 시험계통에 과도상태를 유발하지 않는 계통의란을 적용하여 배터리 에너지저장장치의 정상상태 제어전략을 검증하였다. 이때 시험계통에 연결된 2대의 배터리 에너지저장장치의 용량을 4MW로 가정하였다. 다음 그림 4는 시험계통에서 1MW의 부하증가가 발생하였을 때 배터리 에너지저장장치의 SOC 변동결과를 제어전략에 따라 비교한 것이다.

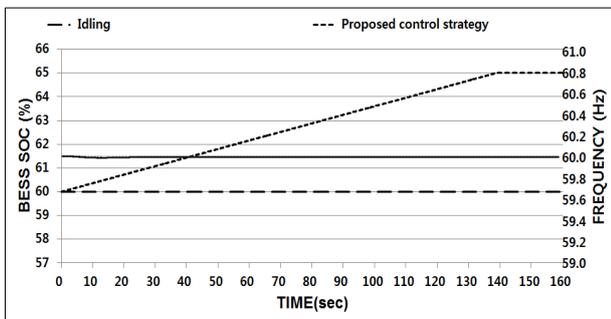


그림 4 불감대 영역에서 BESS 제어결과 비교
Fig. 4 Comparison of controlled results of BESS within a dead band

단, idling은 주파수 변동이 불감대 범위 이내일 경우 배터리 에너지저장장치의 출력을 0으로 제어하는 전략으로 가정하였다. 그림 4에서와 같이 본 논문의 제어전략에서는 주파수 변동이 불감대 영역 내에 있을 경우에도 SOC를 확보하도록 배터리 에너지저장장치의 충·방전을 제어함에 따라 배터리 에너지저장장치를 정격의 5%인 0.2MW로 충전하여 60%인 초기 SOC가 65%까지 증가됨을 알 수 있다.

한편, 그림 5는 시험계통에서 모의시작 1초 후에 13.5MW 용량의 발전기 탈락이 발생하였을 때 주파수변동에 따른 배터리 에너지저장장치의 출력제어 결과를 SOC 수준별로 비교 분석한 것이다.

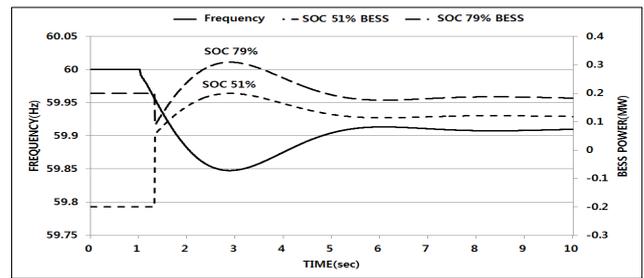


그림 5 SOC에 따른 BESS 출력 제어 결과
Fig. 5 Controlled Outputs of BESS with different SOC

그림 5에서와 같이 초기 SOC가 51%로 가정된 배터리 에너지저장장치는 상정고장 전에 0.2MW로 충전되고, 초기 SOC가 79%로 가정된 배터리 에너지저장장치는 상정고장 전에 0.2MW로 방전되나 상정고장 시 주파수 하락에 따라 주파수 회복을 위해 계산된 제어 요구량을 각각의 SOC 비율에 따라 분담하여 방전을 하게 된다.

4.2 정상상태 제어전략의 SOC 관리효과

본 절에서는 34시간동안의 국내 전력계통 주파수 실측치를 적용하여 배터리 에너지저장장치의 정상상태 제어전략의 SOC 관리효과를 검증하였다. 다음 그림 6과 7은 본 절에서 적용한 주파수 실측치와 주파수 변동량에 대한 분포를 나타낸다.

그림 6에 보이듯이 정상상태에서 실측 주파수의 변동 폭은 제한적이거나 변동의 빈도수는 매우 높다. 다만 그림 7에서와 같이 주파수 변동량의 분포를 분석하면 불감대 이외의 영역에서의 주파수 변동량의 분포가 비대칭으로 나타나 이에 따라 배터리 에너지저장장치의 충·방전을 제어할 경우 배터리 에너지저장장치의 SOC 운전구간을 일정하게 유지할 수 없게 된다.

본 절에서는 시험계통에 4MW BESS 2대를 연결하고, 초기 SOC를 각각 50%로 가정한 후 이러한 주파수 실측치를 적용하여 배터리 에너지저장장치의 정상상태 제어전략을 검증하였다. 다음 그림 8과 9는 각각 주파수 실측치에 대한 배터리 에너지 저장장치의 제어결과 예와 SOC 변동을 나타낸다.

단, idling은 주파수 변동이 불감대 범위 이내일 경우 배터리 에너지저장장치의 출력을 0으로 제어하는 전략으로 가정하였다. 그림 8에서와 같이 주파수 편차가 불감대 범위 이내일 경우 BESS의 충전이 시작된다. 따라서 그림 9에서와 같

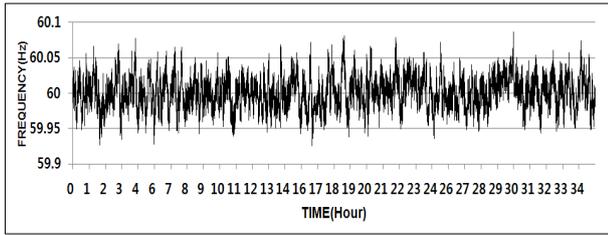


그림 6 34시간 동안의 실측 주파수
Fig. 6 Frequency measured for 34 hours

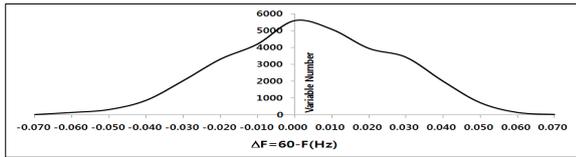


그림 7 주파수 변동량의 분포
Fig. 7 Distribution of Frequency Deviation

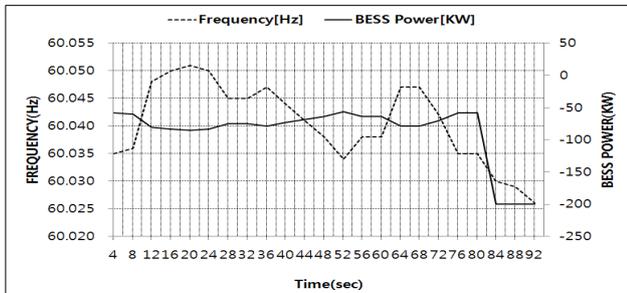


그림 8 주파수 실측치에 대한 BESS 제어결과
Fig. 8 Controlled power of BESS for measured frequency

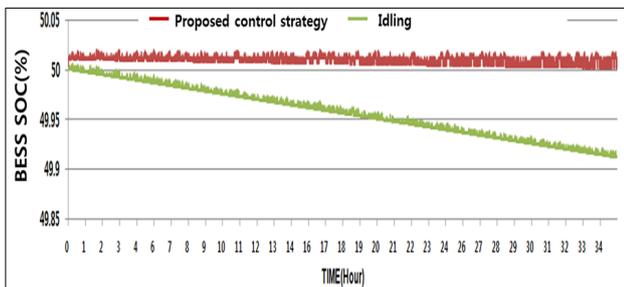


그림 9 제어전략에 따른 BESS SOC 비교
Fig. 9 Comparison of BESS SOC with different control strategies

이, 배터리 에너지저장장치의 SOC 운전구간을 관리하지 않은 경우 주파수 변동량의 분포가 비대칭으로 인해 SOC가 50% 이하로 감소하나 본 논문에서 제안한 제어전략을 적용한 경우에는 SOC 운전구간의 관리가 적용됨에 따라 실측 주파수 하락의 빈도수가 상승의 경우보다 많음에도 불구하고 SOC가 50% 이상으로 유지되고 있다.

4.3 과도상태 제어결과

본 절에서는 시험계통에 과도상태를 유발하는 계통외란을

적용하여 배터리 에너지저장장치의 과도상태 제어전략을 검증하였다. 이때 시험계통에 연결된 배터리 에너지저장장치의 2대의 용량을 각각 12MW, 초기 SOC는 각각 40%와 60%로 가정하였다. 다음 그림 10는 시험계통에서 모의시작 1초 후에 28MW의 부하증가가 발생하였을 때 주파수변동에 따른 배터리 에너지저장장치의 출력제어 결과를 제어전략에 따라 비교한 것이다.

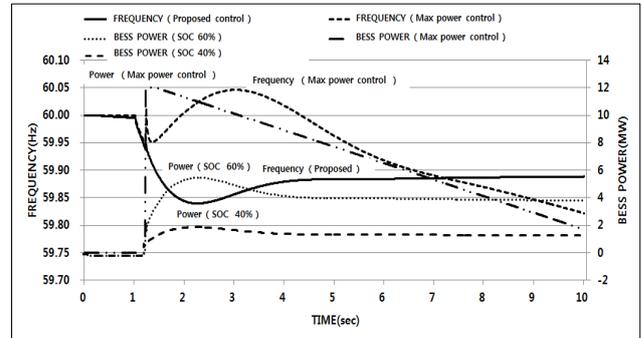


그림 10 제어전략에 따른 과도상태에서의 BESS 출력 비교
Fig. 10 Comparison of BESS output with different control strategies during a transient period

그림 10에서와 같이 상정고장 이후 주파수가 급격히 하락함에 따라 각각의 배터리 에너지저장장치가 최대출력으로 응동하는 경우에는 오히려 계통 주파수가 기준 값 이상으로 상승 하였으나 본 논문에서 제안한 제어전략에서는 배터리 에너지저장장치가 주파수 회복을 위해 계산된 제어 요구량을 각각의 SOC 비율에 따라 분담하여 방전함으로써 주파수가 과도하게 상승하지 않고 정상상태로 회복되었다.

한편 그림 11은 본 논문에서 제안한 배터리 에너지저장장치의 제어전략을 반영하여 시험계통에서 1초에 35.1MW의 부하증가가 발생하였을 때 배터리 에너지저장장치의 용량 증대에 따른 주파수 응답을 비교한 것이다.

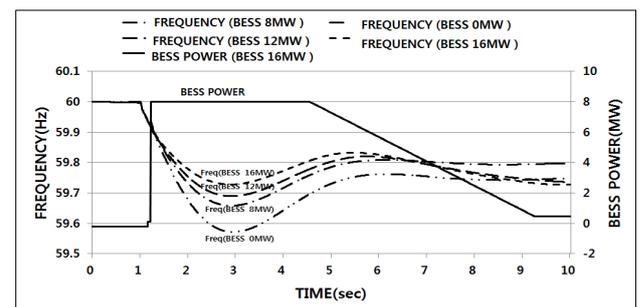


그림 11 BESS 용량에 따른 계통주파수 응답 변동
Fig. 11 Change of Frequency Response with various capacities of BESS

그림 11에서와 같이, 동일한 상정고장에서 배터리 에너지 저장장치가 설치되지 않았을 경우 과도 주파수는 59.57Hz 까지 하락하였다. 하지만, 배터리 에너지저장장치가 설치되어 본 논문에서 제안된 제어전략을 적용한 경우 배터리 에너지저장장치의 용량을 8, 12, 16MW로 증가시킴에 따라 최

소 과도 주파수가 상승됨을 확인하였다. 다음 표 6는 이러한 모의해석 결과를 요약한 것이다.

표 4 BESS 용량에 따른 최소 과도 주파수 변동

Table 4 Change of a minimum transient Frequency with various capacities of BESS

BESS 용량	0MW	8MW	12MW	16MW
최소과도주파수	59.57Hz	59.66Hz	59.69Hz	59.72Hz

5. 결 론

본 논문에서는 대규모 전력계통에서 배터리 에너지저장장치를 주파수조정에 보다 효과적으로 적용하기 위해 전력계통의 운전조건과 배터리 에너지저장장치의 SOC를 고려하는 배터리 에너지저장장치 제어전략을 제안하였다. 즉, 정상상태에서는 배터리의 수명단축을 최소화하기 위하여 배터리가 특정 SOC구간 내에서 주파수 제어를 수행하도록 하고, 과도상태에서는 배터리 에너지저장장치의 가용용량을 최대한 사용하여 주파수 제어를 수행하도록 함으로써 주파수제어에 의한 배터리 에너지저장장치의 수명단축 영향은 경감하면서 속응제어에 의한 계통주파수 제어효과를 극대화 할 수 있다. 또한, 제안된 제어전략에서는 다수의 배터리 에너지저장장치가 설치되어 있을 경우 계통외란으로 인한 주파수 변동 시 배터리 에너지저장장치의 전체 설치 용량에 대한 주파수제어 요구량을 먼저 계산한 후 이를 각 배터리 에너지저장장치의 SOC에 따라 비례 배분하여 제어함으로써 배터리 에너지저장장치의 주파수제어를 더욱 효율적으로 수행하면서 배터리 에너지저장장치의 SOC 운전구간을 관리하는데 기여할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 SOC 기반의 배터리 에너지저장장치 제어전략을 시험계통에 적용한 다양한 사례연구를 통해 주파수조정용 배터리 에너지저장장치 제어알고리즘의 유효성을 검증하였고, 더욱이 국내 전력계통 주파수 실측치에 적용해 봄으로써 제안된 알고리즘이 배터리 에너지저장장치의 SOC를 관리할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 잦은 충·방전이 요구되는 전력계통 주파수조정에 배터리 에너지저장장치를 적용함으로써 우려되는 배터리의 수명감소를 완화시킬 수 있을 것으로 판단된다. 향후 본 논문에서 제안된 배터리 에너지저장장치 제어알고리즘을 국내에서 진행 중인 관련 실증사업에 적용하여 성능을 실증하고 배터리 에너지저장장치 보급 사업에 적용함으로써 전력계통 주파수 안정화에도 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문의 일부 내용은 전력계통 주파수조정용 ESS제어 알고리즘 개발 연구과제로 수행되었음(한전 전력연구원)

이 논문의 일부 내용은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A1014863).

References

- [1] KEMRI, “Weekly Report 제 38, 42호”, Oct. 2012.
- [2] “Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide”, Sandia National Laboratories, Feb. 2010.
- [3] “World Energy Outlook 2010”, International Energy Agency, 2010.
- [4] A.G. Ter-Gazarian, “Energy Storage for Power Systems”, The institution of Engineering and Technology, 2011.
- [5] MKE, “K-ESS 2020”, May. 2011.
- [6] Muhammad Khalid , “Model Predictive Control Based Efficient Operation of Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control”, 2010 11th International Conference, Control Automation Robotics & Vision, 2010.
- [7] Jiravan Mongkoltanatas, “Energy Storage design for Primary Frequency Control for Islanding Micro grid”, 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2012.
- [8] Gauthier Delille, “Dynamic Frequency Control Support by Energy Storage to Reduce the Impact of Wind and Solar Generation on Isolated Power System’s Inertia”, IEEE Transaction. vol.3, Oct. 2012.
- [9] IEC, “Electropedia: The World’s Online Electrotechnical Vocabulary”, IEC 60050, 2014.
- [10] Alexandre Oudalov, Daniel Chartouni, Christian Ohler, “Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control”, IEEE Transaction, Aug. 2007.
- [11] Siemens PTI, “PSS/E User-Manual”, 2010.
- [12] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, 1994.
- [13] P.M. Anderson, A.A. Fouad , “Power system control and stability 2nd Edition”, Wiley, 2003.
- [14] Operating Criteria for Ancillary Services, KPX, 2008. 11.
- [15] Jun Bum Han, “A Study on the Criteria for Setting the Dynamic Control Mode of Battery Energy Storage System in Power Systems”, KIEE, Vol. 62, No. 4, pp. 444~450, Mar. 2013.
- [16] D. P. Chassin, Z. Huang, M. K. Donnelly, C. Hassler, E. Ramirez, C. Ray, “Estimation of WECC System Inertia Using Observed Frequency Transients”, IEEE Transaction. Power System, vol. 20, pp. 1190-1192, 2005.
- [17] New Power System Engineering, Kil-Young Song, 2011, Dong-II Publisher.

저 자 소 개



윤 준 영 (尹 俊 榮)

1987년 11월 6일생. 2012년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학 석사(전력계통). 2014년~현재 한국전력공사 사원

Tel : 063-240-5625

E-mail : yunjunyeong@kepcoco.kr



유 가 람 (劉 가 람)

1989년 2월 20일생. 2013년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 070-4411-2368

E-mail : garam1838@jbnu.ac.kr



국 경 수 (鞠 京 樹)

1973년 6월 30일생. 1996년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 석사(전력계통). 1998~2004년 한국전기연구원(KERI) 연구원/선임연구원, 2007년 Virginia Tech. 전기공학 박사(전력계통), 2007~2010년 미국 전력

연구원(EPRI) 선임연구원, 2010년~현재 전북대학교 전기공학과 조교수

Tel : 063-270-2368

E-mail : kskook@jbnu.ac.kr



노 도 환 (盧 度 煥)

1951년 8월 17일생. 1973년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동경공업대학 제어공학과 석사. 1987년 동 대학원 제어공학과 박사. 1988년~ 현재 전북대학교 전기공학과 교수.

Tel : 063-270-2398

E-mail : rdh@jbnu.ac.kr



장 병 훈 (張 秉 勳)

1964년 3월 21일생. 1989년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 석사(전력계통). 1999년 동 대학원 전기공학과 박사(전력계통). 현재 한전 전력연구원 ESS 연구사업단 책임연구원

Tel : 042-865-5820

E-mail : jang7@kepri.re.kr