

# 전력계통 적용을 위한 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준에 관한 연구

## A Study on the Criteria for Setting the Dynamic Control Mode of Battery Energy Storage System in Power Systems

한 준 범\* · 유 가 람\* · 국 경 수<sup>†</sup> · 장 병 훈\*\*  
(Jun Bum Han · Garam U · Kyung Soo Kook · Byunghoon Chang)

**Abstract** - This paper presents the criteria for setting the dynamic operating mode of BESS(Battery Energy Storage System) in the bulk power systems. ESS has been expected to improve the degraded dynamic performance of the power system with high penetration of the renewable resources. While ESS is controlled in steady state or dynamic operating mode for its better effectiveness depending on the operating conditions of power systems, the criteria for setting the dynamic operating mode for the transient period needs to be robust enough to cover all the different conditions. The proposed criteria consider the varying conditions and the operating practices of the bulk power systems.

**Key Words** : BESS, Criteria, Power system, Dynamic control, Rate of change of frequency

### 1. 서 론

전기에너지의 저장을 고려하지 않는 실시간 전력수급을 전제로 운영되어 오고 있는 전력계통에서 에너지저장장치는 최근 전력산업이 직면하고 있는 다양한 논점들을 해결할 수 있는 효과적인 기술로 기대되고 있다. 특히 전 세계적으로 2035년까지 신재생 에너지 발전량 비율이 전체 발전량의 1/3 수준에 도달할 것으로 전망됨에 따라[1] 신재생 에너지 발전원의 높은 변동성과 불확실성을 해결해야 하는 상황에서 응답속도가 빠르고 제어성능이 우수한 배터리 에너지저장장치는 전력계통의 효율성과 신뢰성을 동시에 담보하기 위한 가장 효과적인 안전장치가 되어줄 것으로 기대된다[2]. 이에 따라 에너지저장장치 시장도 2011년을 기준으로 2020년까지 약 16배 성장할 것으로 예상되고 있다[3]. 또한 국내에서도 2011년 5월 지식경제부에서 에너지 저장기술 및 산업화 전략을 발표했으며 에너지저장장치의 실증을 추진하여 2015년 이후에는 수십 MW급 규모로 에너지저장장치의 보급을 확대할 계획이다[4].

이와 같은 배터리 에너지저장장치는 우수한 제어성능을 가지는 반면 특히 대용량의 경우 높은 초기 투자비용이 소요되므로 제어성능의 효율성을 극대화하기 위해서는 전력계통에 고장이 발생하여 배터리 에너지저장장치의 빠른 제어성능이 요구되는 과도 기간에 배터리 에너지저장장치가 더욱 활발히 적용되도록 동적 제어모드로 운전하고 그 이외

기간에는 배터리 에너지저장장치의 제어를 최소화하고 동적 용량을 확보하도록 정상상태 제어모드로 운전하게 된다[5]. 동적 주파수 제어의 경우 기존 화력 발전기들의 발전기의 주파수 특성 정수가 정격용량의 0.7~1.4[%MW/0.1Hz]로[6] 매우 낮기 때문에 수 MW의 BESS가 동적 주파수 제어에 참여하는 것은 수백 MW급 발전기의 주파수 제어 성능에 버금간다고 할 수 있다. 따라서 이러한 제어전략이 효과적으로 이루어지기 위해서는 동적 제어가 필요한 전력계통 운전조건을 정확하고 빠르게 판단하여 배터리 에너지저장장치의 운전모드를 동적 제어모드로 전환할 필요가 있다. 기존 연구에서는 적용대상이 되는 전력계통의 특정 운전조건에 대한 주파수 응답특성을 바탕으로 한 Rate of Change of Frequency(ROCOF)값을 일괄적으로 사용하여[5] 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드에 대한 적용여부를 판단하여 일반적인 기준이 제시되지 못하였고, 특히 최근 급속히 증가되고 있는 신재생 발전원의 수용률이나 전력수요의 변동에 따라 전력계통의 동적 성능이 크게 달라질 수 있는 점을 반영하지 못하고 있다[7][8].

본 논문에서는 대규모 전력계통에서 대용량 배터리 에너지저장장치를 동적 제어모드로 운전하기 위한 기준을 제안한다. 이를 위해 전력계통의 전원구성이나 부하수준과 같은 운전조건이 변경됨에 따라 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준이 조정되어야 함을 보이고 이러한 판단 기준을 결정하기 위한 고려사항을 제안한다. 더욱이 계통운영의 고장 제거 시간을 고려하여 이러한 판단기준이 해당 시간 이상 지속될 경우에만 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드를 적용하도록 하여 불필요한 제어모드 변경을 최소화하도록 하였다. 또한, 배터리 에너지저장장치의 자체적인 계통 주파수 감시를 통해 고속 응답을 구현할 수 있도록 계통 주파수의 계측 방법과 그 근거를 보였다. 본 논문에서 제안된 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준은

\* Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk National University, Korea

\*\* Korea Electric Power Research Institute

<sup>†</sup> Corresponding Author, Life member : Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk National University, Korea

E-mail : kskook@jbnu.ac.kr

Received : December 24, 2012; Accepted : March 13, 2013

시험계통을 이용한 다양한 사례연구를 통해 유효성을 확인하였다.

## 2. 배터리 에너지저장장치의 운영제어

### 2.1 배터리 에너지저장장치의 전력계통 적용

전력 계통에서 배터리 에너지저장장치는 표 1과 같이 발전에서 판매 분야에 이르기까지 전력계통 전반에 걸쳐 다양한 적용효과가 기대된다[9].

표 1 ESS의 계통 적용 효과

Table 1 Benefits of applying the ESS on power system

Area	Constraints	Effect of ESS
Fuel	Volatility	Risk Reduction
Generation	Load factor	Load Arbitrage
Transmission	Congestion, Stability	Efficiency, Stabilization
Distribution		
Customer	Sensitive Load	Power Quality

이러한 에너지 저장장치의 계통 적용효과로는 전력수요의 변동성을 보완하여 발전비용의 불확실성을 경감하거나, 전력수요를 평활화 하여 전력설비의 부하율을 높이며 전력망의 용량 한계로 인한 계통혼잡을 완화하거나 계통 고장 직후의 과도 기간에 유효전력의 제어를 통해 계통 안정화에 기여하며 또는 민감 부하에 대한 전력 품질 유지 등이 있다.

### 2.2 배터리 에너지저장장치 운영제어

배터리 에너지저장장치는 전력계통의 운전조건을 고려하여 정상상태와 동적 제어모드로 구분하여 운전하는 것이 효과적이다[5]. 배터리 에너지저장장치의 정상상태 제어모드는 고장이 없는 계통 정상상태 시 적용되며 State of Charge(SOC)와 계통 주파수를 고려한 제어전략으로 이를 요약하면 다음 식(1)과 같다. 전력계통의 정상상태에서는 급속한 계통 제어가 필요하지 않으므로 배터리 에너지저장장치의 제어 응답을 최소화하여 가용 용량을 확보하도록 제어 전략을 설정한다.

$$P_{ES} = \begin{cases} 0, \Delta f \leq -30mH \\ 0\% \leq SOC < 40\% \begin{cases} -10\% \text{ of } P_n, -30mHz \leq \Delta f \leq 30mHz \\ P_{req}, 30mHz < \Delta f \end{cases} \\ 40\% \leq SOC \leq 80\% \begin{cases} P_{req}, \Delta f \leq -30mHz \\ -5\% \text{ of } P_n, -30mHz < \Delta f \leq 30mHz \\ P_{req}, 30mHz < \Delta f \end{cases} \\ 80\% < SOC \leq 100\% \begin{cases} P_{req}, \Delta f \leq -30mHz \\ 10\% \text{ of } P_n, -30mHz < \Delta f \leq 30mHz \\ 0, 30mHz < \Delta f \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

Where,  $\Delta f = f - f_{ref}$ ,  $P_{req} = K_d \Delta f (MW)$   
 $K_d = \Delta P / \Delta f$ ,  $P_n$ : Rated Power (MW)

즉, 정상상태 제어모드의 운영 제어전략을 요약하면 다음과 같다. 배터리 에너지저장장치는 낮은 SOC 범위에서 운전 시 수명이 감소되기 때문에 본 논문에서는 40%의 SOC를 배터리 에너지저장장치의 방전 한계 범위로 설정하였다. 또한 배터리 에너지저장장치의 잦은 충·방전 동작을 방지하기 위해 국내 전력계통 운영현황을 고려하여  $\pm 30mHz$ 의 주파수 변동을 불감대로 가정하고 이때는 SOC 수준에 따라 계통의 외란으로 인식되지 않을 만큼의 적절한 양으로써 정격의 10% 혹은 5%로 충전하여 충전량을 확보하도록 한다[10][11]. 한편 40%~80%의 SOC 범위에서는 불감대 이외의 영역에서 계통 주파수 변동에 따라 기존 발전원의 4% Droop 특성을 적용한  $K_d$  값을 적용하여 충·방전 제어를 수행하며 80%~100%의 SOC 범위에서는 방전 제어만을, 0~40%의 SOC 범위에서는 충전 제어만이 가능하도록 제어된다.

한편, 계통 고장이 발생한 직후의 과도상태 시에는 배터리 에너지저장장치의 제어가 최대한으로 발휘되도록 방전 한계 범위 이상의 SOC에서는 국내 전력계통의 계통정수 K(발전력 탈락량에 대한 계통 주파수 변동률)를 적용하여 배터리 에너지저장장치의 출력을 제어한다. 이때 계통정수 K는 계통에서 발전기 탈락 시 최소 주파수 시점에서 발전기 탈락량에 대한 주파수 편차에 해당하는 값으로 전력계통 과도 시에 배터리 에너지저장장치의 특성상 빠른 제어가 가능하기 때문에 계통 외란 발생 후 최소 주파수 시점까지의 도달 이전 시점부터 동작이 가능한 영역에서 주파수 하락에 비례하여 계통에서 요구하는 최대 출력량을 기준으로 배터리 에너지저장장치의 요구량을 산정하여 계통정수 K를 산정하였다. 또한, 계통이 과도 기간으로부터 회복되기 시작하여 정상상태의 제어모드로 복귀될 때는 급격한 출력 변동을 방지하기 위해 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 출력량을 일정 비율로 감소시킨 후 정상상태 제어모드로 변경한다. 다음 식(2)는 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드를 나타낸다.

$$P_{ES} = \begin{cases} 0\% \leq SOC < 40\%, 0 \\ \begin{cases} \frac{df}{dt} < 0, K \times \Delta f \\ \frac{df}{dt} \geq 0 \& P_{af} > (K_d \times \Delta f), P_{af} \\ \frac{df}{dt} \geq 0 \& P_{af} \leq (K_d \times \Delta f), K_d \times \Delta f \end{cases} \\ 40\% \leq SOC \leq 100\% \end{cases} \quad (2)$$

Where,  $K$ : System Const,  $K_d$ : Droop Const (MW/Hz)  
 $t_d$ : Duration Time,  $P_n$ : Rated Power (MW)  
 $P_{af}$ : Exit Control Power (MW) ( $P_{af} = P_n - 0.4 \times t_d$ )

### 3. 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준

앞서 기술된 배터리 에너지저장장치의 제어전략을 효과적으로 적용하기 위해 일반적으로는 주파수 변화율(ROCOF)을 전력계통의 과도상태를 판단하는 기준으로 사용하며 이에 대한 정의는 식(3)과 같다[5][7][12][13].

$$\frac{df}{dt}(t_0) = \frac{f_0}{2H_{total,system}} \times \frac{-\Delta P}{P_{total}} \quad (3)$$

Where,

$$df/dt(t_0) : \text{ROCOF}[\text{Hz/s}]$$

$$f_0 : \text{Frequency at the time of fault occured}[\text{Hz}]$$

$$t_0 : \text{Time of fault ouuced}[s]$$

$$\Delta P : \text{Amount of tripped Generator} [MW]$$

$$H_{\text{total,system}} : \text{Power System Inertia}[s]$$

이때, ROCOF는 발전기 탈락량( $\Delta P$ )에 비례하고  $H_{\text{total,system}}$ 에 반비례하며,  $H_{\text{total,system}}$ 는 각 발전기의 고유한 관성(Inertia)을 고려한 평균적인 등가 개념으로 전체 계통 관성을 나타낸다[5].

반면, 최근 더 커지고 있는 신재생 발전원의 수용률과 전력 수요의 변동과 같은 운전조건 변화는 전력계통의 동적 제어능력을 크게 변동시켜 이에 따라 ROCOF의 값도 달라질 수 있기 때문에 특정 운전조건에서 계산된 ROCOF 값을 기준으로 배터리 에너지저장장치의 제어모드를 결정하게 될 경우 부정확한 제어가 일어날 수 있다. 이에 따라 본 절에서는 전력계통의 운전조건을 고려하여 과도상태를 감지할 수 있도록 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준과 주파수 계측방법을 제시한다.

### 3.1 최소 발전기 탈락 시 ROCOF

전력계통은 대부분의 설비가 야외에 노출되어 있어 다양한 상정고장이 발생하게 된다. 본 논문에서 배터리 에너지저장장치는 순간적인 수급 불균형으로 인한 전력계통의 불안정화를 방지하기 위해 동적 제어모드를 적용함에 따라 불필요한 계통 고장에는 응동하지 않되 전력수급 불균형의 직접적인 원인이 되는 발전기 탈락의 경우에는 즉시 응동할 수 있어야 한다. 이때, 식(3)에서 볼 수 있듯이 운전 중인 발전기 중 최소 발전기 탈락 시가 해당 주파수 변화율이 가장 완만하기 때문에 배터리 에너지저장장치가 과도상태를 인지하기 위한 가장 보수적인 조건이라고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준을 현재 운전 중인 최소 발전기 탈락 시의 ROCOF로 적용하고 이를  $\xi$ 로 표기하였다. 이를 통해 전력계통에서 임의의 발전기 탈락 시에 BESS가 동적제어 모드로 운전될 수 있다.

### 3.2 지속시간

배터리 에너지저장장치의 동적제어모드를 온라인으로 판단할 경우, 계통에 발생하는 다양한 외란으로 인해 배터리 에너지저장장치의 제어가 필요하지 않은 경우에도 동적 제어모드가 실행되는 결과가 나타날 수 있다. 따라서 이러한 동적 제어모드로 판단되는 경우가 일정 시간 이상 지속될 때만 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드를 적용하여 불필요한 제어모드 변경을 최소화하도록 할 필요가 있다.

한편, 국내의 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준에 따르면 전력계통 안정성 유지에 대한 대책수립을 위해 계통 검토 시 적용하는 조건으로 3상 단락고장 사고 시 고장 제거 시간을 345kV이하 계통에서는 6 cycle(=0.1s) 이내와 765kV이하 계통에서는 5 cycle 이내로 규정하고 있다[15]. 따라서 계통 외란이 발생하여 0.1초 이상 지속 시 계통에

과도상태가 발생한 것으로 판단하여 본 논문에서 배터리 에너지저장장치의 계통 과도상태 감지 후 해당 조건이 6 cycle(0.1초)이상 지속되는 경우에 동적 제어모드로 동작하도록 설정하였다.

### 3.3 주파수 계측

계통에 외란이 발생하여 계통 주파수가 변동할 경우 주파수 변화율은 아래와 같이 순간 주파수 변화율과 구간별 주파수 변화율로 측정될 수 있다. 그림 1은 발전기 탈락 시 계통 주파수와 실시간으로 측정된 순간 주파수 변화율을 A, B, C, D 지점에서 점선으로 표시한 것으로 측정 지점에 따라 그 값이 크게 변하는 것을 알 수 있다.

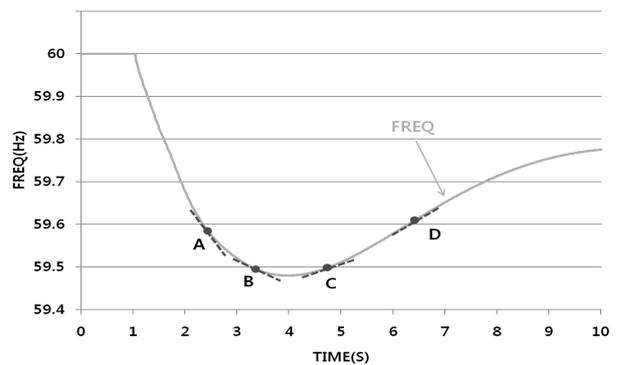


그림 1 순간 주파수 변화율(Hz/s)  
Fig. 1 Instant Rate of Frequency Change

반면, 다음 그림 2는 발전기 탈락 시 A와 A'지점사이(0.1초)의 해당 구간에서 주파수 변화율을 측정하는 것이다.

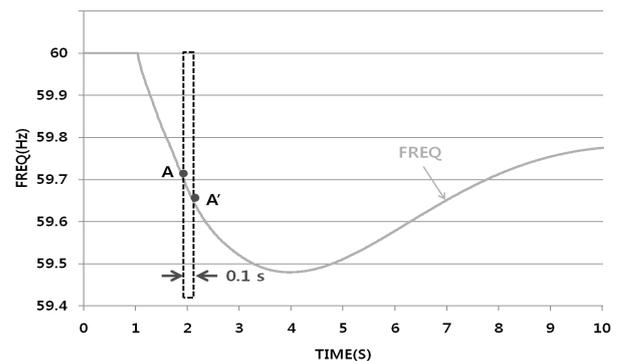


그림 2 구간별 주파수 변화율(Hz/s)  
Fig. 2 Sectional Rate of Frequency Change

3.2절에서 계통의 과도상태를 보다 정확히 판단하기 위한 동적 제어모드 판단기준에 0.1초 이상의 지속시간을 포함함에 따라 다음 그림 3은 계통 최소 발전기 탈락을 모의하여 과도상태 시에 순간 주파수 변화율 및 구간별 주파수 변화율을  $\xi$  값과 비교하여 나타낸 것이다.

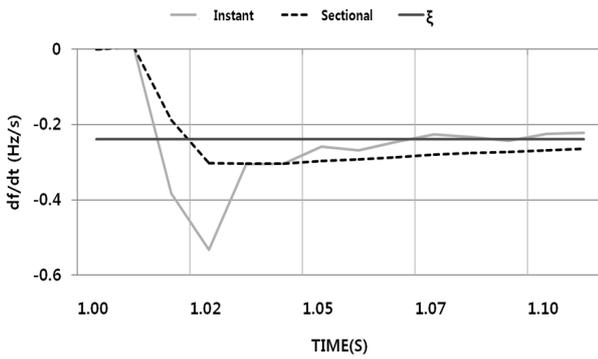


그림 3 최소 발전기 탈락시의 순간 df/dt 및 구간별 df/dt  
 Fig. 3 Instant & Sectional df/dt with the trip of Min. Generator

즉, 그림 3에서 측정된 주파수 변화율이  $\xi$  값보다 작으면 배터리 에너지저장장치는 계통을 과도상태로 감지한다. 이때 순간 및 구간별 주파수 변화율이  $\xi$  값보다 작을 때의 지속시간을 살펴보면 0.1초의 지속시간을 만족하는 경우는 구간별 주파수 변화율이라는 것을 알 수 있다.

### 3.4 계통 운전조건을 고려한 동적 제어모드 판단기준 설정

앞에서 기술한 바와 같은 방법으로 산정된  $\xi$  값은 전력계통 구성설비들의 동적응답을 모두 반영하여 결정되기 때문에 전력계통의 운전조건에 따라 달라질 수 있다. 다음 그림 4는 부하수준에 따라 계통에서 동일한 발전기 1기의 탈락을 가정했을 때  $\xi$  값을 식(3)과 같이 계산한 값이다.

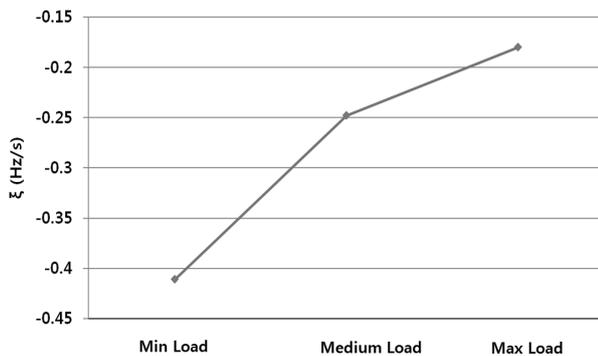


그림 4 부하수준에 따른 제타 값 변화  
 Fig. 4 Change of  $\xi$  depending on the load level

그림 4에서 볼 수 있듯이 동적 제어모드 판단기준( $\xi$ )은 동일한 발전기 탈락 시에도 부하수준에 따라 각각 다르게 설정되며 부하수준이 높을수록 기동되는 발전기의 용량이 증가함에 따라  $\xi$ 의 절대값이 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 식 (3)과 같이  $\xi$ 가 전력계통에서 운전 중인 총 발전량과 관성계수에 따라 달라질 때 부하수준에 따라 이를 공급하는 발전기들의 구성과 출력이 달라지기 때문이다. 다음 그림 5

는 풍력 수용률을 각기 다르게 설정한 후 동일한 특정 발전기 탈락 시의  $\xi$  값을 계산한 것이다. 이때 풍력 수용률은 계통에서 운전하고 있는 총 발전량 중에서 풍력 발전량이 차지하는 비율로 산정하였다.

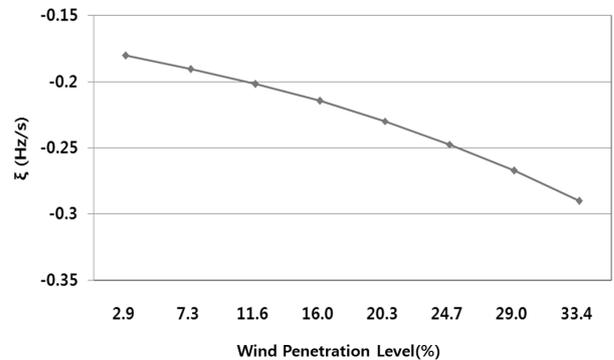


그림 5 풍력 수용률에 따른 제타 값 변화  
 Fig. 5 Change of  $\xi$  depending on penetration level of the wind generation

그림 5에서 볼 수 있듯이 풍력 수용률에 따라 동적 제어모드 판단기준은 다르게 산정되며 풍력 수용률이 클수록  $\xi$ 의 절대 값이 커지는 것을 알 수 있다. 위와 같이 동적 제어모드 판단기준은 동일 발전기 탈락 시에도 계통의 부하수준이나 풍력 수용률과 같은 계통 운전조건에 따라 각기 다른 값으로 산정되는 것을 확인하였다. 이에 따라 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준은 부하수준이나 풍력 발전량과 같은 계통 운전조건을 반영하여 설정해야 함을 알 수 있다. 즉, 운전 중 발전기의 발전 출력량과 각 기기의 관성(H)을 수집하여 최소 발전기 탈락 시의 ROCOF를 계산한 후 이를 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준으로 설정한 후 PMS(Power Management System)에 입력하여 전력계통의 운전조건이 크게 변경될 때에는 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준을 변경할 수 있을 것이다. 다만, 이러한 계통운영조건을 실시간으로 반영하는 데에 한계가 있고 그 차이가 크지 않을 수 있으므로 실제 구현 단계에서는 대상 계통의 특성을 반영하여  $\xi$ 값이 크게 변경되는 운영조건의 구간별로 계통운영조건을 반영하는 방식 등의 실용적 접근이 필요하며 본 논문에서는 이의 필요성을 제기하고자 한다.

## 4. 사례연구

본 절에서는 제안된 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준을 시험계통에 적용하여 그 유효성을 검증하였다. 본 사례연구는 대규모 전력계통 해석에 활용되는 PSS/E 프로그램을 이용하였고 그림 6의 시험계통은 PSS/E 프로그램에서 제공된 일반 시험계통으로써 총 발전량 691.1MW, 총 부하량 685.9MW로 구성되었으며 사례연구를 위해 풍력 발전기와 배터리 에너지저장장치를 추가로 시험계통에 연계하였다.

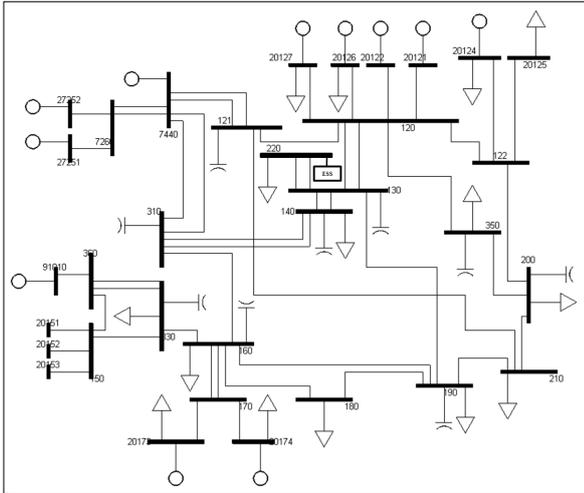


그림 6 시험계통  
Fig. 6 Test system

4.1 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준

다음 표 2는 계통 최대 부하 시 풍력 발전기 출력이 20.25MW인 운전조건을 가정하여 개별 발전기 탈락 시 주파수 변화율을 계산한 값이다.

표 2 ROCOF 계산결과

Table 2 The calculation results of ROCOF

	Tripped Generator		ROCOF [Hz/sec]
	Power [MW]	H [sec]	
1	20.25	0	-0.240
2	36	6.71	-0.471
3	36	6.71	-0.471
4	46	5.4	-0.603
5	72.71	5.93	-1.037
6	80	5.93	-1.165

이때 계통 전체의 등가관성(Htotal,system)은 4.287(s)이며 풍력 발전기의 관성(H)은 0으로 가정하였다. 표 2에서 볼 수 있듯이 최소 발전기 탈락시의 ROCOF 값이 가장 완만한 기울기의 주파수 변화율을 가지고 있어 이를 배터리 에너지 저장장치의 동적 제어모드 판단기준( $\xi$ )으로 설정하였다. 그림 7은 동적 제어모드 판단기준과 5기의 개별 발전기 탈락량에 따른 구간별 주파수 변화율을 나타낸 것이다.

따라서 모든 발전기를 대상으로 발전기 탈락 이후 구간 주파수 변화율이 최소 발전기의 동적 제어모드 판단기준 보다 작기 때문에 어떠한 발전기 탈락에 의한 계통 과도상태도 감지 가능하게 된다.

4.2 과도상태 주파수 변동률 계측방법 설정

배터리 에너지저장장치는 계통의 최소 발전기 탈락 시 ROCOF( $\xi$ ) 보다 주파수 변화율이 (음의 값으로)클 때 계통

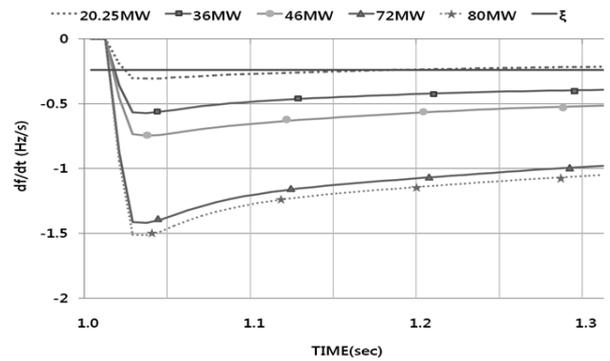


그림 7 최소 발전기 탈락시의 ROCOF와 과도상태 주파수 변동률 비교

Fig. 7 Comparison of ROCOF at min. generator trip and transient frequency change rate

을 과도상태로 감지하고 이러한 조건이 0.1초 이상 지속되면 동적 제어모드로 운전된다. 다음 표 3은 다양한 발전기 탈락 시에 과도상태 주파수 변동률의 계측방법에 따라 과도상태 감지조건을 정리한 것이다.

표 3 주파수 계측방법에 따른 지속시간 비교

Table 3 Comparison of duration time measured by different methods

	Tripped Generator	Duration time	
		Measured by Instant df/dt	Measured by Sectional df/dt
1	20.25	0.058	0.175
2	36	0.058	0.116
3	46	0.066	0.149
4	72.71	0.075	0.233
5	80	0.058	0.175

표 3을 살펴보면, 과도상태 주파수 변동률 계측방법 중 순간 주파수 변화율을 이용한 계측방법은 실제 과도상태가 발생하였더라도 주파수 변동률이 0.1초의 지속시간을 만족하지 못하였으나 구간별 주파수 변화율 계측방법은 이를 만족하였다.

다음 그림 8은 앞 절에서 설정된 동적 제어모드 판단기준을 이용하여 동일 계통에서 운영 중인 발전기 중 최소 발전기 탈락 시의 과도 주파수 변동률 계측방법과 이에 따른 배터리 에너지저장장치의 제어모드를 비교한 것이다.

그림 8에서와 같이 구간별 주파수 변화율을 이용하여 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드에 대한 동작여부를 결정했을 때는 표 3에서 볼 수 있듯이 지속시간을 만족하였기 때문에 배터리 에너지저장장치가 동적 제어모드로 동작되는 것을 확인할 수 있으나 순간 주파수 변화율을 이용했을 때는 지속시간을 만족하지 못하여 배터리 에너지저장장치가 정상상태 제어모드로 동작하는 것을 알 수 있다.

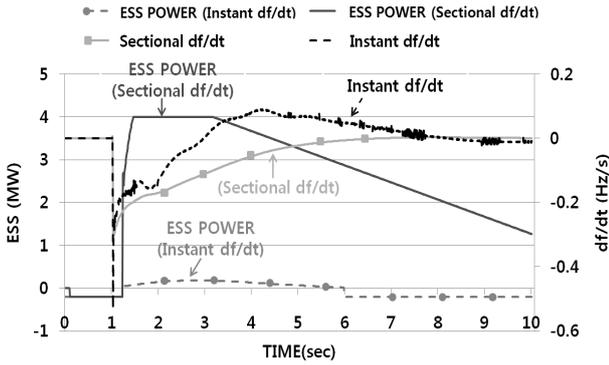


그림 8 주파수 계측방법에 따른 에너지저장장치 제어모드 변경

Fig. 8 Change of ESS control mode depending on method of monitoring frequency

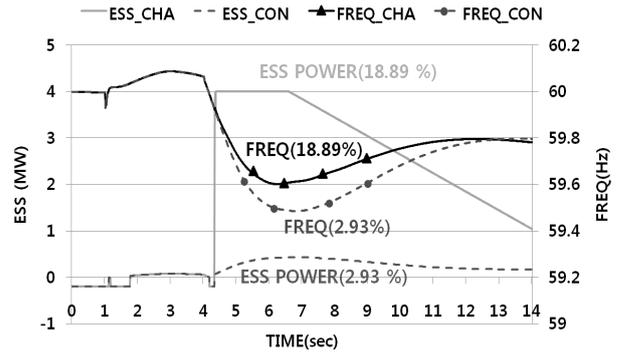


그림 9 계통 운전조건 변동에 따른 ESS 동적 제어모드 판단기준의 변경 필요성

Fig. 9 The necessity of changing the criteria for setting dynamic mode of ESS depending on the operating conditions of power system

4.3 계통 운전조건 변동에 따른 ESS 동적 제어모드 판단기준 변경의 필요성

다음 표 4는 시험계통에서 풍력 발전 비율이 2.93%일 때와 18.89%일 경우의 계통구성을 나타낸 것이다. 이때, 본 논문에서 사용된 풍력 발전 비율은 계통의 총 발전량 중에서 풍력 발전 출력의 비율로 계산하였다. 표 4를 살펴보면 풍력 발전 비율이 변경된 경우 이에 따라 에너지저장장치의 동적 제어모드 판단기준을 변경하지 않으면 일부 발전기 탈락에 의한 과도상태를 에너지저장장치가 감지하지 못할 수 있음을 알 수 있다.

표 4 풍력 발전 비율에 따른 전원구성 및 ROCOF  
Table 4 Generation mix and ROCOF of power system

Gen	Generation mix			
	Wind power 2.93%		Wind power 18.89%	
	Gen [MW]	ROCOF [Hz/s]	Gen [MW]	ROCOF [Hz/s]
A	20.25	-0.2149	130.95	-1.8224
B	55	-0.6524	40	-0.6186
C	40	-0.4692	10	-0.1436
D	40	-0.4692	21	-0.3127
E	95	-1.2596	51	-0.8256
F	40	-0.4635	40	-0.6255
G	150	-1.8972	150	-2.6446
H	250	-3.5912	250	-5.2934

그림 9는 표 4에 따라 풍력 발전 비율이 2.93%인 조건에서 설정된 동적 제어모드 판단기준을 풍력 발전 비율이 18.89%로 변경된 후에도 계속 적용하였을 때 계통 최소 발전기 탈락 시 배터리 에너지저장장치의 운영결과를 나타낸 것이다.

그림 9에서와 같이 풍력 발전 비율이 변경되었음에도 이를 동적 제어모드 판단기준을 변경하지 않은 경우는 배터리 에너지저장장치가 계통의 과도상태를 감지하지 못하고 정상상태 제어모드로 동작하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 배

터리 에너지저장장치의 동적 제어모드를 결정할 때에는 풍력 발전 비율과 같은 계통 운전조건이 크게 달라질 경우 이를 고려하여 상황에 맞게 동적 제어모드 판단기준을 설정해야 함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 대규모 전력계통에서 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드를 효과적으로 설정하기 위한 기준을 제안하였다. 동적 제어모드는 순간적인 수급 불균형으로 인해 발생하는 전력계통의 과도 기간 동안 배터리 에너지저장장치를 더욱 효과적으로 사용하기 위한 것으로 그 판단기준이 객관적이고 전력계통의 운전조건을 반영할 수 있어야 정확한 적용이 가능하다. 본 논문에서는 전력계통에서 풍력 발전 비율이나 부하수준과 같은 운전조건이 변경됨에 따라 동적 제어모드 판단기준이 변경 되어야 함을 보이고 이를 고려한 운영방안을 제안하였다. 또한 동적 제어모드 판단 시 판단기준 만족의 지속시간 유지조건과 구간별 주파수 변화율 기준의 주파수 계측의 유용성을 보임으로써 배터리 에너지저장장치의 더욱 정확한 동적제어모드 전환을 제안하였다. 향후 본 논문의 제안사항을 고려하여 배터리 에너지저장장치의 동적 제어모드를 더욱 고도화하고 이를 실증연구에 적용할 계획이다.

감사의 글

이 논문의 일부내용은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A1A1014863).

References

[1] "World Energy Outlook 2010", International Energy Agency, 2010.  
[2] A.G. Ter-Gazarian, "Energy Storage for Power

Systems”, 2011, The institution of Engineering and Technology.

- [3] Fuel Cells Annual Report, Pike research, 2011.
- [4] “Strategy for developing and industrializing ESS technologies”, The Ministry of Knowledge Economy, 2011.5
- [5] Gauthier Delille, Bruno François, Gilles Malarange “Dynamic Frequency Control Support: a Virtual Inertia Provided by Distributed Energy Storage to Isolated Power Systems”, Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), IEEE PES 2010.
- [6] New Power System Engineering, Kil-Young Song, 2011, Dong-Il Publisher.
- [7] T. Inoue, H. Taniguchi, Y. Ikeguchi, K. Yoshida, “Estimation of Power System Inertia Constant and Capacity of Spinning-reserve Support Generators Using Measured Frequency Transients”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, issue 1, Feb. 1997.
- [8] D. P. Chassin, Z. Huang, M. K. Donnelly, C. Hassler, E. Ramirez, C. Ray, “Estimation of WECC System Inertia Using Observed Frequency Transients”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, pp. 1190-1192, 2005.
- [9] Kyung Soo Kook, Jun Bum Han, Jun-ho Lee, ByungHoon Chang “Application Analysis of Energy Storage on the Transient Stability of Power systems”, SGRC at CBNU, 2011.11.
- [10] Alexandre Oudalov, Daniel Chartouni, Christian Ohler “Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 22, AUGUST 2007.
- [11] Operating Criteria for Ancillary Services, KPX, 2008. 11.
- [12] Elements of Power system Analysis, WiliamD. Stevenson, McGraw-Hill, 1982.
- [13] Brendan Fox, Damian Flynn, Leslie Bryans, Nick Jenkins, David Milborrow, Mark O’Malley, Richard Watson and Olimpo Anaya-Lara “Wind Power Integration” , The Institution of Engineering and Technology, 2007.
- [14] Market Rules, KPX, 2011. 12.
- [15] Standards for Reliability and Power Quality of Power Systems, The Ministry of Knowledge Economy, 2011 12.

## 저 자 소 개



### 한 준 범 (韓 竣 範)

1984년 4월 4일생. 2011년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2011년~현재 전북대 대학원 전기공학과 석사과정  
Tel : 070-4411-2368  
E-mail : kova007@jbnu.ac.kr



### 유 가 램 (劉 加 람)

1989년 2월 20일생. 2013년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 전북대 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 전기공학 석사(전력계통). 1998~2004년 한국전기연구원(KERI) 연구원/선임연구원, 2007년 Virginia Tech. 전기공학 박사(전력계통), 2007~2010년 미국 전력연구원(EPRI) 선임연구원, 2010년~현재 전북대학교 전기공학과 조교수  
Tel : 063-270-2368  
E-mail : kskook@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 송배전연구소 책임연구원  
Tel : 042-865-5820  
E-mail : jang7@kepri.re.kr